

Illuminations : Cosmos et esthétique

Jean-Pierre Luminet

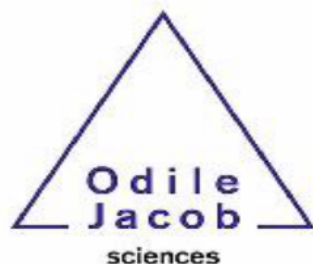
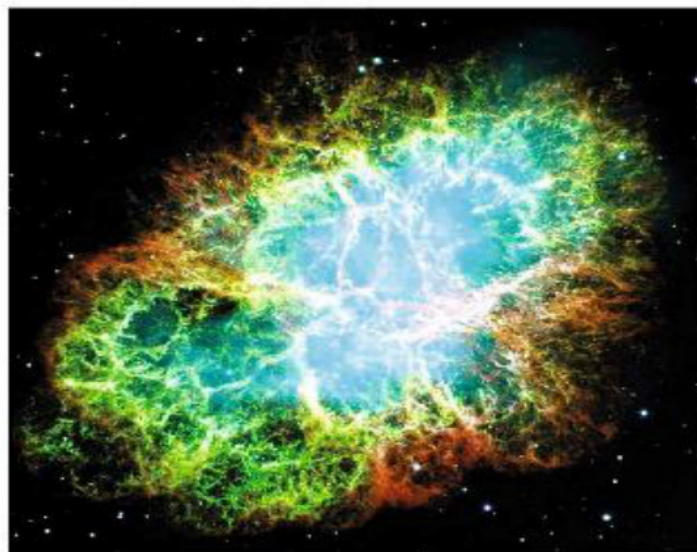
VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

JEAN-PIERRE LUMINET

ILLUMINATIONS

COSMOS ET ESTHÉTIQUE



Jean-Pierre Luminet

Illuminations

Cosmos et esthétique



© ODILE JACOB, SEPTEMBRE 2011

15, RUE SOUFFLOT, 75005 PARIS

www.odilejacob.fr

ISBN : 978-2-7381-8593-8

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5 et 3 a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Ce document numérique a été réalisé par Nord Compo

« Mon âme est un orchestre caché ; je ne sais de quels instruments il joue et résonne en moi, cordes et harpes, timbales et tambours. Je ne me connais que comme symphonie. »

Fernando PESSOA,
Le Livre de l'intranquillité.

Avant-propos

Cet ouvrage est constitué d'un ensemble d'essais que j'ai rédigés entre 1979 et 2009. Il commence toutefois par une esquisse autobiographique écrite en 2011 pour les besoins du présent livre, où je retrace quelques étapes de mon parcours scientifique en insistant sur mes années de formation et la naissance de ma vocation d'astrophysicien. La suite est découpée en chapitres et sous-chapitres qui reflètent la variété des thèmes auxquels je me suis intéressé, en commençant bien sûr par les sciences de l'Univers, qui occupent la première moitié du volume. La seconde partie aborde des thématiques pour moi tout aussi essentielles, liées à l'histoire et à la philosophie des sciences, au rôle de l'imagination dans la création scientifique et artistique, mais aussi à la musique, aux arts plastiques, à la poésie et à la littérature.

Les cinq premiers chapitres sont consacrés à des sujets scientifiques sur lesquels j'ai travaillé : la nature de l'espace et du temps, la théorie de la relativité, les trous noirs, la cosmologie et les modèles de Big Bang, la géométrie de l'Univers, l'évolution stellaire, sans oublier les petits corps du système solaire. Bien entendu, tous ces textes s'adressent à un public non spécialisé, mais curieux. Ayant été l'un des premiers chercheurs français à travailler sur les mystérieux trous noirs, j'ai été très vite sollicité pour écrire des articles de vulgarisation sur la question. J'y ai immédiatement pris goût ; avec des parents enseignants, j'ai toujours eu le souci de la pédagogie ; d'autre part, j'ai vite saisi l'enjeu de la culture scientifique : pour moi, jouer un rôle dans sa diffusion, c'est participer à l'humanisme de notre époque. Mes activités de vulgarisation scientifique ont donc pris par la suite des formes très variées : livres, films, expositions, conférences, etc. Je garde cependant une prédilection pour l'écriture, que j'ai pratiquée dès mon plus jeune âge sous des formes aussi diverses que la poésie, la nouvelle ou le roman. Je sais aujourd'hui que certains de mes essais de vulgarisation ont suscité des vocations, et c'est là une récompense magnifique.

La seconde moitié de l'ouvrage traduit ma conviction profonde que les arts et les sciences sont foncièrement liés. J'ai toujours été

attaché aux rapprochements entre les diverses formes de l'invention humaine. Différentes approches – scientifique, historique, philosophique, esthétique, etc. – engendrent en effet différentes perceptions du monde, mais sous-tendues par un imaginaire commun. Une part importante de mes activités a donc porté sur la mise en perspective de ces rapprochements.

L'histoire des sciences, que j'ai découverte assez tardivement, mais pour laquelle je me suis aussitôt passionné, permet d'appréhender quelques-uns des rouages obscurs de la pensée créatrice, avec ses doutes, ses errances, ses inspirations, ses découvertes.

Comme je suis adepte depuis mon plus jeune âge de plusieurs disciplines artistiques comme le dessin, la gravure, la sculpture et la musique, on m'a souvent demandé de m'exprimer sur le rôle de l'imaginaire dans la création. J'ai eu l'opportunité de le faire à diverses reprises dans des instituts des beaux-arts et d'en retirer d'enrichissants échanges avec des créateurs à vocation purement artistique. Quant à la musique, ma discipline de prédilection, elle m'a conduit à de très belles collaborations avec des compositeurs de musique contemporaine. Cet ouvrage retient quelques traces de mes nombreuses excursions culturelles, sans lesquelles je ne saurais d'ailleurs concevoir ma vie de « chercheur », au sens le plus large du terme.

Quant à la poésie, qui nourrit le thème du dernier chapitre, elle m'est absolument nécessaire – pour la musique de la langue, l'économie de mots et de moyens, la polysémie. Et parce que son langage spécifique permet de parler de ce que la science ne peut pas dire : le cosmos intérieur, les profondeurs de l'âme humaine.

En résumé, fasciné par les différents récits du monde que nous livrent la science, la philosophie, les arts et la littérature, j'ai toujours voulu raconter l'étrange Univers qui nous entoure en le dessinant, en le filmant, en le mettant en équations, en mots, en musique et en poèmes, tout en continuant à chercher un ordre caché derrière l'élégante beauté des abstractions mathématiques.

Jean-Pierre Luminet,
février 2011

Mon parcours scientifique

Je suis né dans le midi de la France, aux pieds du Lubéron. Vivant à la campagne dans un endroit assez isolé, je passais le plus clair de mon temps à jouer dans mon jardin. J'ai toujours beaucoup aimé une certaine solitude, qui a développé ma curiosité pour les phénomènes de la nature environnante. Je passais des heures à observer le patient travail des colonies de fourmis ou le tissage des toiles d'araignées, et certaines nuits je contemplais le ciel. Curieusement, bien plus que de repérer les brillantes constellations, je plongeais en pensée dans le noir, entre les étoiles ... là où il n'y avait « rien ». En réalité, j'y projetais mon imaginaire et je peuplais le noir de la nuit d'astres invisibles.

Je transcrivais mes observations dans un grand classeur, dans l'espoir de bâtir une encyclopédie : les noms des constellations avoisinaient ceux des palmipèdes et des lacs. J'ai d'ailleurs été très tôt fasciné par les encyclopédies. En mes jeunes années, j'avais la manie des listes : les cascades, les fleuves, les montagnes, tout était bon à classer par ordre de hauteur, longueur, altitude, et à remplir de grands tableaux tracés à l'encre bleue sur des cahiers. Je trouvais de quoi alimenter mes listes en épluchant l'une après l'autre les milliers de pages de l'énorme dictionnaire Larousse en huit volumes datant des années 1900, hérité d'une vieille tante excentrique. Un été, après la classification des reptiles, des palmipèdes et des échassiers, ma passion s'était portée vers les lacs canadiens. Une campagne d'exploration du Grand Nord canadien menée à la fin du XIX^e siècle avait mesuré la superficie d'une multitude de ces lacs, lesquels se trouvaient répertoriés dans le huitième et dernier volume du dictionnaire : le supplément. Une aubaine ! Je les notai avec une patiente gourmandise dans un cahier à spirale. À ma grande surprise, au fil des pages, je constatai que le terme de « planète télescopique » revenait plus souvent que celui de « lac canadien ». Cela n'arrêtait pas, les planètes télescopiques pullulaient ! Je me mis à feuilleter systématiquement ce fabuleux ouvrage, dernier refuge de l'aventure, du fantastique et de la poésie. Puis, rassemblant mes notes, je fis ma propre compilation de planètes télescopiques, reclassées par numéro croissant. C'est ainsi que

je délaissai la géographie terrestre et me passionnai pour un essaim d'astéroïdes virevoltant par milliers autour du Soleil. Je ne me doutais pas que, bien des années plus tard, l'Union astronomique internationale donnerait mon patronyme à l'astéroïde numéro 5523, rocher d'une douzaine de kilomètres découvert au mont Palomar en 1991 et gravitant à 400 millions de kilomètres de nous, entre Mars et Jupiter.

À la même époque, je me souviens avoir lu dans un magazine un article intitulé : « Comment fabriquer sa propre lunette astronomique ? » J'avais alors acheté auprès du tapissier de Cavaillon des tubes en carton, de ceux autour desquels les tissus sont enroulés, en choisissant deux qui pouvaient coulisser l'un dans l'autre. J'avais aussi commandé par correspondance une lentille et un oculaire. Mon instrument était ainsi monté. Je portais à bout de bras ma « lunette astronomique », faisant coulisser les tubes jusqu'à obtenir une bonne distance focale et une image nette. Le trépied qui aurait dû stabiliser le tout n'a jamais vu le jour. Là s'est arrêtée ma vocation pour l'observation et l'instrumentation astronomique... Il est vrai que, d'esprit plus abstrait que pratique, je n'ai jamais eu l'envie de démonter un poste de radio pour voir comment cela fonctionnait ; en revanche, la vision du ciel nocturne me portait à la méditation sur de grandes questions : qu'est-ce que le noir ? Qu'est-ce que l'espace ou l'invisible ? Bien des années plus tard, j'ai découvert la profonde pensée d'Héraclite, qui est devenue presque une devise chez moi : « Nature aime se cacher. [...] L'harmonie de l'invisible est plus belle que l'harmonie du visible. » Je m'aperçois après coup, quand je réfléchis à mon parcours en sciences et dans les autres domaines, que j'ai toujours travaillé sur l'invisible : par exemple, comment déceler la lumière à partir du noir, ou à l'inverse, comment révéler la nature du noir à partir des épingles de lumière visible. C'est une question de poète au moins autant que d'astrophysicien.

Une autre image poétique qui a fortement marqué mon imaginaire de l'époque est venue de la lecture d'un tome de l'encyclopédie Bordas consacré à l'astronomie. L'auteur, Roger Caratini, un véritable érudit possédant des talents de vulgarisateur, y présentait en deux pages finales la relativité générale d'Einstein. Une de ses expressions m'avait fortement intrigué : il y parlait du « mollusque espace-temps ».

C'est d'ailleurs la poésie qui fut à l'adolescence l'un de mes moyens d'expression privilégiés. En réalité, toute discipline qui permettait d'exercer une certaine créativité m'intéressait : outre mes carnets de poésie, je faisais du dessin et, plus tard, je me pris d'une passion violente pour la musique. Je me mis à pratiquer le piano et à composer. Si je n'avais pas commencé si tard, j'aurais aimé devenir

soliste, chef d'orchestre ou compositeur.

Pour en revenir à l'astronomie, une autre lecture m'a passionné vers l'âge de 15 ans, celle de la célèbre *Astronomie populaire* de Camille Flammarion (dans son édition revue en 1960 par André Danjon). Suivant les conseils de ma mère, j'ai écrit une lettre à Charles Fehrenbach, qui était alors directeur de l'Observatoire de Saint-Michel-de-Provence, près de Forcalquier, pour lui demander conseil sur la façon de devenir astronome et de faire un stage. Il ne m'a pas répondu. Il devait être très sollicité, tout comme je le suis aujourd'hui par des dizaines de jeunes à l'esprit curieux et qui sont passionnés par l'Univers. Je n'avais pas insisté, car, en réalité, l'astronomie ne faisait pas partie de mes passions essentielles, lesquelles, je le répète, allaient à la musique, à la poésie et à la peinture. De nombreuses possibilités s'offraient à moi. Je n'avais pas de vocation au sens d'un désir enraciné de me diriger vers un métier bien défini. Serais-je musicien, écrivain ou artiste peintre ? Je n'avais aucune idée de ce que pouvait signifier le métier de chercheur scientifique. Mes parents, enseignants, me laissaient faire : ils m'encourageaient dans mes diverses passions, en espérant cependant que je me déciderais à devenir ingénieur, pour eux aboutissement logique de bonnes études scientifiques et symbole de la réussite sociale.

La suite fut essentiellement une affaire de circonstances. Mes facilités en mathématiques m'ont naturellement conduit vers une filière scientifique, voie royale de l'enseignement français. J'aimais beaucoup cette matière, qui correspondait parfaitement à ma propension naturelle à réfléchir à des choses abstraites. Sans effort, je pouvais poursuivre cette voie sans sacrifier mes centres d'intérêts artistiques et littéraires. En vérité, après le baccalauréat, essentiellement poussé par mes parents et leur désir de me voir réussir, j'ai passé deux ans en classes préparatoires aux grandes écoles dans un lycée marseillais. Dès cette époque, je pressentais pourtant que le métier d'ingénieur ne serait pas à mon goût. J'ai toujours été d'une farouche indépendance ; je me voyais mal exécuter les ordres d'un chef dans le cadre d'un programme décidé en haut lieu ; seule m'intéressait l'idée de réfléchir à ma guise, de travailler en totale liberté. Outre mon goût prononcé pour l'abstraction, c'est l'une des raisons pour lesquelles, lorsque je suis devenu plus tard chercheur professionnel, j'ai choisi la voie purement théorique, afin de ne pas être lié à de grands programmes instrumentaux.

En attendant de trouver ce qui me satisferait, je continuais de lire sans cesse et je me rendais compte un peu plus chaque jour du fossé entre mes passions diverses pour le monde de la culture et l'exigence de bachotage à laquelle se soumettaient mes camarades. Je me souviens avoir écrit mes premières petites nouvelles de fiction en

pleine classe, pendant les cours de physique qui m'ennuyaient. Alors que j'étais très intéressé par les mathématiques, je trouvais l'enseignement de la physique rébarbatif, avec ses problèmes de circuits électriques ou d'hydrostatique ; j'ai compris bien plus tard que la physique était tout simplement *mal* enseignée, alors qu'elle pouvait être rendue passionnante ! Un soir à l'étude, après les cours, pendant que mes camarades travaillaient comme des fous sur des exercices de maths, je lisais *Les Fleurs du mal*. L'un d'eux s'est approché de moi et m'a demandé pourquoi je perdais mon temps... Pauvre de lui ! Je détestais déjà la séparation des savoirs. D'un côté, les scientifiques ; de l'autre, les littéraires. Et à mesure que je progressais dans le cursus scolaire, le clivage était de plus en plus prononcé. On voulait me ranger dans la boîte « scientifique » simplement parce que j'étais bon en maths. Alors j'en ai eu assez, et au grand dam de mes professeurs et de mes parents, qui me voyaient intégrer aisément Polytechnique car j'avais d'excellentes notes, j'ai bâclé les concours. Je me suis retrouvé à la faculté de Marseille en licence de mathématiques. J'ai bien entendu choisi l'option « mathématiques pures » plutôt que l'option « appliquées », également proposée. Privilégiant le pouvoir d'abstraction, je visais en effet toujours la beauté de la discipline plutôt que son utilité.

L'honnêteté m'oblige à dire que je me rendais assez peu aux cours en amphi. Je préférais de loin me procurer les photocopiés. D'une manière générale, je n'ai jamais beaucoup appris par l'enseignement oral (bien que j'aime moi-même beaucoup enseigner) ; encore aujourd'hui, cette manière de s'instruire me convient peu. J'ai toujours préféré les livres. Ce métier de chercheur qui nous impose d'étudier notre vie entière, je l'ai conçu essentiellement comme une activité solitaire, plongé dans les publications et les ouvrages de référence ; je n'ai jamais beaucoup fréquenté les séminaires ou les conférences internationales, sinon en tant qu'orateur invité.

Pour en revenir à ces deux années de faculté, je me souviens avoir surtout pratiqué la musique et la littérature – lecteur fou, je lisais en moyenne dix livres par mois, et durant les vacances, j'ai écrit mes trois premiers romans (non publiés).

C'est aussi durant ces années-là que j'ai lu le livre qui a été le véritable déclencheur de ma vocation scientifique. C'était une *Introduction à la cosmologie*, signée Jean Heidmann. Ce radioastronome, parfait gentleman que je devais rencontrer plus tard à l'Observatoire de Paris, a consacré une grande partie de sa carrière au programme Seti dédié à la recherche d'intelligences extraterrestres. Son livre de vulgarisation, de haut niveau, abordait l'étude de l'Univers par la géométrie et la relativité générale ; grâce à lui, j'ai compris que les études de mathématiques pures que je suivais en

dilettante fournissaient les outils adéquats pour traiter quelques-unes des grandes questions que je me posais quand j'étais plus jeune : l'Univers est-il fini ou infini ? Quelle est la forme de l'espace ? Quelle est l'architecture de l'invisible qui gouverne le monde ? J'ai su à ce moment-là que je devais poursuivre dans cette voie ; j'ai surtout découvert qu'il existait une profession dite de « chercheur », qui allait me permettre d'exercer ma créativité avec les outils que je possédais : les mathématiques, la géométrie, l'écriture. De plus, dans ce qui m'attirait, la recherche fondamentale, il n'y avait pas ou peu de contraintes sinon celles que l'on s'imposait : beaucoup de cogitations solitaires, peu de travail en équipe ou alors en petit groupe, aucune obligation de s'enfermer dans un projet expérimental demandant de grosses manipulations et de pesants cahiers des charges. C'est vraiment à la lecture de ce livre que tout cela m'est apparu de manière lumineuse.

La faculté de Marseille proposait alors aux étudiants de mathématiques un certificat optionnel d'astronomie, auquel je me suis inscrit. Les cours avaient lieu à l'Observatoire de Marseille, place Le Verrier, du nom de l'astronome du XIX^e siècle qui avait prédit la position de Neptune à partir des calculs d'orbite et fondé l'Observatoire de Marseille. C'est le professeur Fehrenbach, à qui j'avais écrit une dizaine d'années plus tôt lorsque j'étais adolescent, qui en avait la charge. C'était un homme charmant, qui dispensait cependant un cours très classique ne parvenant pas à combler ma soif de nouveautés. À vrai dire, je m'y ennuyais un peu devant les suites de diapositives sur le Soleil ou les belles nébuleuses que l'on nous proposait.

Mon esprit bouillonnait de questions étranges. Une nouvelle lecture a joué un rôle déterminant dans mon orientation, celle d'un petit opuscule sur les trous noirs. À l'époque, on commençait tout juste à formuler l'hypothèse de leur existence. L'idée d'une distorsion de l'espace et du temps faisant office de piège à lumière et à matière m'a immédiatement fasciné, d'autant qu'il s'agissait d'un phénomène encore mal compris. J'avais lu que l'astrophysicien allemand Karl Schwarzschild, le premier à avoir trouvé en 1916 une solution exacte des équations de la relativité générale, avait défini un rayon critique en dessous duquel une étoile d'une masse donnée ne laisserait échapper plus aucune lumière. J'avais alors demandé à la personne chargée des travaux dirigés de nous évoquer cette nouvelle trouvaille. Elle avait d'abord été un peu abasourdie, car c'était un sujet complètement hors programme, mais elle avait fait l'effort de trouver de quoi nous initier à ces problèmes catalogués comme « très théoriques ». De mon côté, je nageais dans le bonheur à l'idée d'étudier les propriétés du rayon de Schwarzschild.

À la fin de l'année, Fehrenbach a eu l'honnêteté et la gentillesse de me dire en substance : « Si vous voulez faire de l'astronomie théorique, ne restez pas à Marseille ! Allez plutôt à Montpellier, où le professeur Andrillat est en train de monter un DEA de cosmologie. Ou alors à Paris. »

J'ai choisi Montpellier, car mon meilleur ami y faisait ses études de médecine. Pendant l'été précédant la rentrée, j'ai lu par curiosité l'ouvrage de cosmologie du professeur Andrillat, sur lequel son cours était fondé. C'était un homme d'une grande culture et, au cours de cette année 1975, je suis allé à la fac surtout pour discuter et échanger des idées avec lui. Là encore, je n'ai pas appris beaucoup dans ses cours, puisque j'avais déjà lu et digéré son livre. J'ai pris l'initiative de me lancer dans la lecture de deux ouvrages de haut vol qui venaient juste de paraître : *The Large Scale Structure of Spacetime* de Stephen Hawking et George Ellis, et *Gravitation* de Charles Misner, Kip Thorne et John Wheeler – de vraies bibles de la discipline. J'ai rédigé un énorme mémoire de DEA intitulé « Groupes d'isométries en relativité générale ». C'était en fait de la pure géométrie différentielle, que j'essayais de comprendre et de restituer à ma façon. À la fin de l'année, Andrillat m'a conseillé à son tour d'aller poursuivre mes études ailleurs ... À l'Observatoire de Meudon précisément, où existait depuis peu un Groupe d'astrophysique relativiste.

Un des meilleurs spécialistes mondiaux des trous noirs venait en effet d'en prendre la direction : le Britannique Brandon Carter arrivait directement de Cambridge et ne connaissait pas vraiment le fonctionnement du système de recherche en France... Sans quoi, il n'aurait pas accepté de prendre illico sous son aile un jeune étudiant venu du midi de la France, simplement parce qu'il était chaudement recommandé par son professeur ! Il m'avait demandé de venir le rencontrer, lui et son équipe fraîchement constituée, lors d'une de ces écoles d'été dont les chercheurs sont friands : je me suis donc rendu avec beaucoup d'enthousiasme à ces Journées relativistes 1975 où, bien sûr, il était principalement question de débattre des conséquences de la relativité générale d'Einstein. Je me suis d'abord présenté à mes futurs collègues. J'avais alors à l'époque un fort accent qui dévoilait mes origines méridionales. Je provoquais leur incrédulité : « Tu ne dois pas avoir le niveau, tu ferais mieux de retourner à Montpellier », me disait-on. « On m'a recommandé auprès de M. Carter, je vais tenter ma chance », répondais-je ingénuement.

Brandon Carter a su faire confiance au jeune étudiant enthousiaste que j'étais. De plus, il m'a dirigé vers un sujet de thèse riche et passionnant : la « conjecture BKL », concernant les singularités apparaissant dans certains modèles de la cosmologie relativiste. C'est ainsi que l'on désigne les points de l'espace-temps où certains

paramètres physiques deviennent infinis. Le centre des trous noirs est une singularité de l'espace-temps, un point où la gravité devient infinie, ainsi que le début de l'Univers tel qu'il est décrit par la théorie du Big Bang. Par essence, on ne peut appréhender les singularités avec les outils de la physique, seulement avec ceux des mathématiques – ce qui me convenait parfaitement.

Je peux aujourd'hui témoigner de l'extrême richesse du sujet : trente-cinq ans après, la conjecture BKL n'est toujours pas complètement prouvée... Bien entendu, à l'époque j'ignorais cet aspect !

N'ayant pas de bureau attiré à l'Observatoire, je travaillais dans ma chambre d'étudiant. Lorsque je venais à Meudon, c'était surtout pour discuter de tout, sauf du sujet de ma thèse. Je préférais avancer seul. Au bout d'un an, j'ai obtenu une bourse du British Council me permettant d'aller travailler trois mois à l'Université de Cambridge, dans le laboratoire de Stephen Hawking. Il était déjà célèbre dans le petit monde des physiciens, et j'étais très impressionné d'avoir un bureau au prestigieux DAMTP (Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics).

Durant mon séjour s'est tenu un grand colloque sur la relativité générale. Ce fut l'occasion de croiser les meilleurs « relativistes » de l'époque : George Ellis, John Wheeler, Roger Penrose et bien d'autres. Leurs noms étaient associés aux grandes découvertes de la physique des trous noirs et de la cosmologie. Les rencontrer et discuter avec eux était un grand honneur pour le débutant que j'étais. Je me rappelle avoir vu arriver un jour au DAMTP un monsieur à la peau basanée qui cherchait le bureau de Stephen Hawking. Pas peu fier de connaître les lieux, je l'ai aimablement renseigné. Il s'est alors présenté : c'était Subrahmanyan Chandrasekhar ! Je connaissais bien entendu cette notion fondamentale de l'astrophysique relativiste qu'est la « limite de Chandrasekhar ». C'est la masse critique au-dessus de laquelle une étoile de type « naine blanche » s'effondre gravitationnellement pour devenir un astre très dense : une étoile à neutrons, voire un trou noir. Rencontrer ainsi l'un des plus grands noms de la discipline (futur prix Nobel) m'avait alors vraiment impressionné. Plus tard, j'ai eu l'occasion de revoir Chandrasekhar à l'Observatoire de Meudon, et il a longtemps gardé au mur de son bureau à Chicago l'image virtuelle de trou noir que j'ai calculée en 1979, et dont je lui avais offert une reproduction agrandie sous forme de poster. J'ai revu aussi Penrose pour discuter avec lui de sa collaboration avec l'artiste néerlandais Escher, des pavages et des relations entre la science, l'art et la géométrie. J'ai recroisé plusieurs fois aussi Hawking, avec lequel il est cependant difficile de communiquer longtemps en raison de son handicap... Je me souviens cependant combien son œil avait brillé

d'intérêt lorsque, lors d'un de ses passages à Meudon, je lui avais montré la partition de l'opéra de Wagner *Tristan et Isolde* !

Au cours de ces mois d'étude intensive, j'ai trouvé une nouvelle orientation pour mon sujet de thèse, assez proche du sujet initial et toujours dans une voie très mathématique, et je suis allé présenter mes résultats à Brandon Carter. Il s'attendait en effet à ce que je ne puisse pas résoudre le problème qu'il m'avait donné, mais que je trouve une autre piste tout seul, ce qui prouverait ma capacité à me débrouiller seul dans la recherche. C'est précisément ce que j'avais fait ! J'ai donc soutenu ma thèse en 1977 sur le sujet abstrus des « singularités dans les espaces-temps spatialement homothétiques » et publié mes premiers articles dans les revues internationales spécialisées.

Inutile de préciser que ces travaux n'étaient guère compréhensibles par la communauté des astronomes français, de sorte que je ne pouvais guère prétendre à un poste au CNRS en poursuivant dans cette voie. D'autant que l'année d'après, j'ai dû effectuer mon service militaire dans le contingent scientifique. Je partageais mon temps entre l'École polytechnique, où je faisais de l'analyse numérique pour calculer des profils d'aile d'avion, et l'École nationale supérieure des techniques avancées, où je modélisais le fonctionnement de certains systèmes complexes au moyen de « relateurs arithmétiques », sortes d'automates cellulaires en interaction avec leur environnement. J'y ai démontré un « théorème d'imbrication des séquences », que je suis allé présenter à un congrès de cybernétique en Pologne après un voyage en voiture mouvementé sur les autoroutes encore défoncées de l'Allemagne de l'Est.

À mon retour, Carter a eu l'idée de me demander une chose étrange, mais convenant parfaitement à mes aptitudes : si les trous noirs existaient... à quoi pouvaient-ils bien ressembler ? Calculer la forme d'un tel objet était alors une manière de le rendre un peu moins abstrait. Non seulement personne n'avait jamais détecté de trou noir – on n'en avait absolument pas les moyens à cette époque –, mais certaines de leurs propriétés astrophysiques restaient inconnues. Les déformations optiques de configurations lumineuses (étoiles, disques de gaz, etc.) situées dans le voisinage des trous noirs sont caractéristiques de ces objets, et peuvent en principe être utilisées pour les visualiser de façon indirecte, voire en offrir des signatures observationnelles. J'ai donc entrepris de calculer l'apparence « virtuelle » d'un trou noir entouré d'un disque de gaz mince et lumineux. Le fruit de ce travail a été présenté en 1978 à la fois dans une revue spécialisée en anglais et, sous une forme simplifiée, dans le magazine français *La Recherche*, destiné à un public plus large. L'article a été très remarqué. Les lecteurs anglo-saxons, qui ne me connaissaient pas encore, ont même cru que mon nom « Luminet »

signant l'article était un pseudonyme ! Dans la foulée, j'ai décroché en 1979 un poste d'attaché de recherches au CNRS, au sein du Groupe d'astrophysique relativiste. Mon cliché virtuel du trou noir est devenu un « classique » de la littérature sur le sujet, repris dans des ouvrages et des monographies, y compris des films et des œuvres d'art. Nombre de chercheurs ont par la suite amélioré mes calculs en y introduisant des couleurs et du mouvement.

Je dois confesser que le goût d'observer de « vraies images » ne m'est jamais réellement venu. Au début de ma jeune carrière, quand même intrigué par l'ambiance qui pouvait régner dans les observatoires et les grands télescopes perchés dans les montagnes, j'ai voulu savoir à quoi cela pouvait bien ressembler. Des collègues m'ont proposé de les accompagner en mission à l'Observatoire de Haute-Provence. Ce petit séjour d'une semaine m'a définitivement démontré que l'observation n'était pas faite pour moi : il y avait surtout de l'attente, à cause des « temps de pose » élevés pour recueillir assez de lumière provenant de quasars – des astres faibles et lointains. Les manipulations techniques demandaient aussi beaucoup de temps : la caméra électronique devait être refroidie à l'azote liquide. Comme tout objet à température ambiante, elle émettait des flots de rayonnement infrarouge qui venaient perturber les mesures. Bref, un travail fastidieux avec beaucoup de temps morts, tout cela pour ne récolter que quelques taches lumineuses. Cela m'a franchement conforté dans l'idée que l'œil du théoricien, capable de calculer l'image virtuelle d'un trou noir techniquement invisible, était plus performant que celui du télescope !

Toutefois, en quelques années, grâce aux premières observations en rayons X faites par les télescopes embarqués dans l'espace, l'existence des trous noirs avait fortement gagné en crédibilité. Pour moi, l'étape d'après était la thèse d'État. Je me suis demandé ce qui pouvait arriver à une étoile qui s'approcherait très près d'un trou noir géant, du type de ceux dont on soupçonnait déjà l'existence au centre des galaxies (existence largement confirmée depuis). Pouvait-elle être détruite par les forces de marée gravitationnelles, et de quelle façon ? Je suis allé en parler à Brandon Carter, et cette fois nous nous sommes mis à vraiment travailler ensemble ! Nous avons calculé que l'étoile serait d'abord aplatie comme une « crêpe », avant de rebondir et d'exploser. L'article a été publié dans la célèbre revue *Nature* en 1982 et a été suivi de nombreux autres sur le sujet. J'ai soutenu ma thèse d'État en 1985 et pris à mon tour des collaborateurs et des étudiants pour perfectionner les calculs, explorant les diverses possibilités de réactions thermonucléaires dans les crêpes stellaires en fonction de la masse des trous noirs et des types d'étoiles brisées.

La prédiction de telles « supernovæ par accident » a suscité les

travaux de nombreux groupes de par le monde, grosses simulations numériques à l'appui, et une polémique s'est ouverte sur la question de savoir si oui ou non une rupture explosive pouvait être déclenchée. Je me souviens encore d'un rapport de referee extrêmement défavorable à l'égard d'un de mes articles soumis à une grande revue européenne, rapport anonyme mais dont il n'était pas difficile de voir qu'il était signé d'un prestigieux prix Nobel de physique américain à la retraite. La critique étant essentiellement épidermique et pas du tout argumentée sur le plan scientifique, l'éditeur de la revue avait demandé les avis complémentaires de deux autres referees, lesquels ont été si positifs que l'article a finalement été publié, au grand dam du premier referee. Vexé, il n'a plus voulu collaborer avec la revue et a juré de faire savoir, à travers colloques et séminaires, que mon modèle ne tenait pas la route. Le temps ne le lui a pas permis – il est décédé peu après –, et surtout lui a donné tort : quinze ans plus tard, alors que j'avais complètement changé de sujet, des observations effectuées par la nouvelle génération de télescopes spatiaux de haute énergie ont commencé à détecter des éclairs de lumière ressemblant comme deux gouttes d'eau à ceux que nos modèles de « crêpe stellaire flambée » avaient calculés !

Entre-temps, au tout début des années 1990, je m'étais de nouveau passionné pour la cosmologie géométrique, et je décidai de travailler sur la forme de l'Univers à grande échelle. Un pan entier de la cosmologie, à savoir la « topologie de l'espace », restait en effet largement ignoré de la communauté des chercheurs. Or, si la relativité générale nous enseigne que l'espace peut avoir une courbure positive, négative ou nulle, elle ne nous dit pas si son volume est fini ou infini, ni quelle est sa forme globale. Ce champ nouveau de recherches, que j'ai baptisé « topologie cosmique », a été assez lent à se développer. Tout ou presque était à faire. Avec mon ami et collaborateur Marc Lachièze-Rey, nous avons d'abord fait la synthèse des quelques travaux antérieurs sur la question, et notre article de revue, publié en 1995, proposait des pistes de recherche nouvelles qui ont suscité l'intérêt de quelques cosmologistes à l'esprit plus curieux que la moyenne. Le sujet a commencé à devenir « respectable », d'autant qu'un de mes articles de vulgarisation sur la question, écrit cette fois avec des collaborateurs américains, a fait la couverture du célèbre magazine *Scientific American* en 1999. J'ai lancé alors le concept d'« univers chiffonné », selon lequel notre espace physique pourrait être fini, sans bord et plus petit que l'espace observé, avec une topologie suffisamment bizarre pour créer un mirage global et engendrer des images fantômes de galaxies lointaines !

Aussi excitante que pouvait être cette recherche, elle restait totalement théorique : à l'époque nous n'avions aucun instrument

capable de la tester. Nous avons cependant mis au point un certain nombre de « signatures » observationnelles de la topologie cosmique, tout en pensant que nous ne disposerions pas de télescopes capables de les détecter avant une bonne vingtaine d'années. En somme, il fallait être patient pour espérer voir poindre le plus petit indice expérimental, mais de cela je n'en avais cure... C'était une fois de plus la démarche géométrique qui me fascinait, par le voyage immobile qu'elle entraînait, mais aussi le relatif isolement qu'elle induisait.

À certains moments en effet, nous allons si loin dans la recherche théorique que le nombre de personnes avec lesquelles nous pouvons réellement partager nos idées se réduit à une poignée. On se trouve alors dans une forme d'extrême, que je goûte autant que les extrêmes physiques que j'ai connus lors de longs trekkings effectués dans les contrées désolées de l'Islande et de l'Alaska. L'extrême, personne ne nous le propose ni ne nous le demande. C'est nous et nous seuls qui définissons nos extrêmes et décidons d'entreprendre le périple, avec la sensation excitante de *risque* : celui que l'on court quand on explore les frontières. Plus généralement, l'aversion au risque caractéristique de notre société actuelle, hyperprotectrice et frileuse, me met souvent en rogne ! Avec les mathématiques pures et les théories les plus avancées de la physique fondamentale, le chercheur prend des risques intellectuels énormes. Il peut s'engager dans une « galère » de plusieurs années d'explorations sans avoir aucune garantie de trouver quelque chose d'intéressant. Et l'on ne peut ouvrir des chemins nouveaux ou inventer que dans l'endurance, la persévérance et un relatif isolement. Que de doutes et d'errances quand on choisit ce type de cheminement ! Lorsque j'ai commencé à travailler sur les modèles d'univers chiffonnés, j'ai pris un risque. Le sujet était si nouveau et provocateur que durant quelques années, le rythme de mes publications dans les revues spécialisées (à quoi on évalue le plus souvent l'activité d'un chercheur) n'a pu que baisser. Quand vos collègues et les commissions d'évaluation du CNRS vous font plus ou moins gentiment remarquer : « Tu ne publies plus beaucoup ces derniers temps », il faut de l'endurance et de la persévérance pour continuer à avancer. C'est ce que j'ai fait, en m'adjoignant de précieux et brillants collaborateurs. Pendant plusieurs années, nous n'avons publié qu'une poignée d'articles très techniques, n'intéressant qu'une petite frange de la communauté des cosmologistes.

C'est alors que de façon inattendue, en février 2003, les premiers résultats d'un télescope à micro-ondes de la NASA embarqué dans l'espace et spécialisé dans l'étude du rayonnement cosmologique micro-ondes, sont venus apporter un soutien inespéré à nos modèles. En octobre, nous avons publié un article qui a fait la une de *Nature*, dans lequel nous avons fait une étrange proposition concernant la

forme possible de l'Univers : l'espace sphérique dodécaédrique. En raison de la comparaison pittoresque faite par un journaliste britannique entre notre modèle et l'intérieur d'un ballon de football dont les facettes opposées seraient recollées, l'idée a été relayée auprès du grand public par les journaux du monde entier. Comme on peut l'imaginer, le débat s'est aussitôt installé dans la communauté professionnelle, avec partisans et adversaires. C'est ainsi que doit fonctionner la science : la controverse fait avancer, d'autant que plusieurs dizaines de chercheurs se sont enfin mis à étudier sérieusement la topologie cosmique ! Aujourd'hui, en 2011, le modèle n'est ni validé ni invalidé (ce qui est déjà en soi un beau succès). Et en 2013, les données du télescope spatial européen Planck nous diront peut-être si l'Univers possède ou non une telle forme. J'ose penser que j'aurai alors d'autres sujets d'intérêt, même s'ils tourneront encore autour des structures géométriques invisibles de l'espace-temps, de l'infiniment petit à l'infiniment grand...

En effet, je réalise après coup que tous les sujets sur lesquels j'ai travaillé convergent : à toutes les échelles, l'univers physique nous plonge dans des mirages, des illusions optiques et des altérations de la perception que nous nous efforçons de dissiper. J'aime traiter, en fin de compte, de notre rapport à ce que l'on croit être le « réel ». Il est évident que le monde objectif est brouillé par l'imperfection de nos sens, même prolongés par nos instruments les plus sophistiqués. Au-delà de ce poncif, il est impressionnant de voir comment la nature même du monde physique brouille les cartes. La mécanique quantique et son principe d'incertitude sont souvent associés à cette idée de brouillage, mais à l'échelle macroscopique, il existe aussi des distorsions de l'espace et du temps, des mirages gravitationnels, peut-être des mirages topologiques ... Peut-on parler d'un réel voilé¹ ? À condition d'accepter qu'il est possible de déchirer le voile, ou une partie du voile, grâce à nos instruments mathématiques. Nous ne serions pas alors plongés dans l'illusion de manière irréversible, à la façon de la Mâyâ des Hindous. Nous, physiciens théoriciens, faisons le pari – peut-être naïf – qu'à force d'études, nous acquérons les moyens intellectuels de pénétrer plus avant dans le réel.

1- Référence à l'ouvrage de Bernard d'Espagnat *Le Réel voilé* (1994), dans lequel le physicien développe l'idée qu'au-delà de la réalité empirique, il existe un réel irrémédiablement insaisissable.

Temps et relativité

« Temps ! Espace !
Seules divinités qui maîtrisez le monde !...
Je me révolte contre vous ! »

MARINETTI,
Le Monoplan du pape.

La relativité aujourd'hui¹...

Si la relativité restreinte a bouleversé la physique, elle est, aujourd'hui, devenue une théorie classique. Plus complexe et moins bien prouvée, la relativité générale a, néanmoins, résisté victorieusement à toutes les vérifications expérimentales.

Albert Einstein est connu du grand public pour avoir élaboré une théorie déjà mythique, dont le nom seul évoque quelque pratique ésotérique et réputée accessible seulement à un petit nombre de théoriciens. Est-ce parce que cette théorie traite de deux catégories essentielles de l'esprit humain, l'espace et le temps, en des termes révolutionnaires et il faut bien le dire assez éloignés de notre perception courante ? Toujours est-il que l'opinion populaire place instinctivement Einstein parmi les plus grands savants de l'humanité (à juste titre !), mais renonce d'avance à toute tentative pour comprendre sa théorie, ignorant de plus qu'il est également l'auteur de travaux fondamentaux sur le mouvement brownien, l'effet photoélectrique et la théorie corpusculaire de la lumière, ouvrant la voie à l'autre grande révolution de la physique du début du siècle : la mécanique quantique.

Il est important de distinguer entre la théorie de la relativité dite *restreinte* (publiée en 1905) et la théorie de la relativité dite *générale* (publiée en 1915). La première représente le couronnement de toute une série de travaux de physiciens du XIX^e siècle sur l'électromagnétisme et spécifie la structure cinématique de l'espace-temps, fournissant un cadre très général commun à toutes les lois fondamentales de la physique excepté la gravitation. La seconde, création solitaire, traite précisément de l'interaction gravitationnelle et réussit à l'incorporer dans une vision globale et géométrisée de l'univers.

Le terme de « relativité » n'est pas propre à Einstein. En fait, toute la physique d'avant Einstein reposait depuis trois siècles sur le *principe de relativité de Galilée*. Un principe de relativité en physique, que l'on peut considérer comme une sorte d'exigence naturelle, ne fait que traduire la volonté de représenter le monde des phénomènes

indépendamment de la situation des divers observateurs. Il est par exemple intuitif qu'un simple décalage dans l'espace n'affecte pas les lois physiques : celles-ci devraient être les mêmes dans un laboratoire à Paris et dans un autre à Princeton. L'expérience le confirme bien évidemment. Il existe cependant d'autres équivalences moins immédiates et, pour en tenir compte, il est nécessaire de spécifier la classe des observateurs pour lesquels les lois dynamiques sont les mêmes, autrement dit de déterminer les *points de vue* (mathématiquement : les *référentiels*) *équivalents*.

La relativité galiléenne et la relativité restreinte sont ainsi toutes deux fondées sur l'existence d'une classe privilégiée de référentiels dits *inertiels*, à savoir les référentiels ayant les uns par rapport aux autres (d'où le nom de « relativité ») un mouvement de translation uniforme (non accéléré). Galilée avait en effet remarqué qu'il y avait identité de description des phénomènes physiques pour un observateur enfermé dans la cale d'un navire immobile par rapport à la terre ferme, par exemple amarré au quai, et un observateur situé dans la cale d'un navire s'éloignant du quai à vitesse constante en grandeur et direction, donc en translation uniforme par rapport à l'observateur précédent. Si cet observateur lâche une bille à un mètre au-dessus du plancher de la cale, il mesurera dans les deux cas le même mouvement rectiligne selon la verticale avec la même durée de chute, et ce n'est certainement pas ce genre d'expérience qui lui permettra de déterminer s'il se trouve en mer ou à quai (en réalité, bien entendu, le bateau aura toujours de légers mouvements dus à la houle qui seront perçus « viscéralement » par l'observateur). Cette propriété découverte par Galilée découle elle-même d'un autre grand principe de la physique galiléenne, le *principe d'inertie* (d'où le nom des référentiels « inertiels »), selon lequel un corps libre, soumis à aucune force, a un mouvement uniforme (contrairement à ce que suggère de prime abord l'expérience quotidienne, où tous les mobiles ont tendance à s'arrêter sous l'action des frottements).

Selon cette conception, un exemple typique de référentiel inertiel a pour base la Terre elle-même, qui dans son mouvement autour du Soleil et pendant la durée limitée des expériences de laboratoire usuelles, décrit avec une très bonne approximation un mouvement de translation à la vitesse constante de 30 km/s. La détermination géométrique du référentiel se fait en choisissant des directions orientées vers des étoiles fixes, afin de compenser le mouvement de rotation diurne de la Terre.

La révolution de la relativité restreinte

Il s'agit maintenant de formaliser l'équivalence entre les repères

inertiels, c'est-à-dire donner les formules de transformation exprimant le passage d'un référentiel inertiel à un autre, et c'est sur ce point crucial que divergent la relativité galiléenne et la relativité restreinte, puisqu'elles sont associées chacune à des conceptions radicalement différentes sur l'espace et le temps.

Pour la mécanique galiléenne et newtonienne, il existe un temps absolu donné *a priori*, par rapport auquel on mesure les mouvements dans un espace ordinaire à trois dimensions, l'espace bien connu de la géométrie euclidienne.

Prenons l'exemple favori d'Einstein, celui d'un train roulant parallèlement à un talus à la vitesse constante de 108 km/h, soit $v = 30$ m/s. Le talus figure ici l'espace « immobile » par rapport auquel le train se déplace selon un mouvement uniforme, et l'on est bien en présence de deux référentiels inertiels : le train et le talus. Imaginons maintenant un observateur juché sur le toit d'un wagon et qui tire une balle de fusil dans le sens de la marche du train ; le lecteur voudra bien idéaliser l'expérience en oubliant la résistance de l'air, l'instabilité du tireur, les soubresauts du wagon, etc. La vitesse de la balle par rapport au tireur (donc par rapport au train) est $v' = 800$ m/s. D'après les formules de transformation de Galilée exprimant le passage du référentiel inertiel « train » au référentiel inertiel « talus », la vitesse de la balle par rapport au talus est donnée simplement par $v + v' = 830$ m/s. Si le voyageur pivote de 180° et tire dans le sens opposé à la marche du train, la vitesse de la balle mesurée du talus sera $v - v' = -770$ m/s (les vitesses étant comptées positivement dans le sens de la marche).

On voit que les formules de transformation de Galilée entraînent la simple addition vectorielle des vitesses dans le cadre d'un espace tridimensionnel régi par un temps absolu, unique pour tous les observateurs.

La mécanique classique de Galilée et Newton est également liée au concept d'espace absolu. Si Galilée parle d'un observateur qui se meut par rapport à un bateau, lequel se meut par rapport au rivage, la Terre se mouvant par rapport au Soleil, il s'arrête là... Pour lui, le Soleil est fixe dans l'Univers et constitue donc un référentiel inertiel *absolument immobile*.

Newton, plus prudent, se doute que le Soleil pourrait lui-même avoir un mouvement par rapport aux étoiles, mais il tient toujours à l'idée d'un référentiel immobile, et c'est la célèbre notion d'éther qui devait mobiliser l'imagination des physiciens du XIX^e siècle. Un tel concept ne reposait sur aucune observation réelle et relevait davantage de la philosophie que de la science. Mais lorsque Fresnel énonça au début du siècle dernier la théorie ondulatoire de la lumière, l'éther semblait acquérir un statut scientifique objectif. Selon cette

théorie, la lumière est une vibration ; or, croyait-on à l'époque, toute vibration se propage dans un milieu qui vibre (par exemple, l'air s'il s'agit du son) ; par conséquent, la lumière pouvant se propager dans le vide, le vide lui-même devait représenter une substance vibrante parfaitement rigide, l'éther, présent partout aussi bien dans le vide que dans les corps matériels.

La théorie ondulatoire de la lumière devait être couronnée par les admirables travaux de Maxwell, qui établit vers 1870 les lois de l'électromagnétisme. La révolution de la relativité restreinte tient au fait qu'elle invalide les concepts de temps absolu et d'éther en montrant qu'ils sont en contradiction avec la théorie de l'électromagnétisme.

Pour bien comprendre ce point, il faut savoir que le résultat fondamental de l'électromagnétisme est l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 300\,000\text{ km/s}$, et c'est la vitesse maximale de transmission de tout signal physique. Einstein accepte non seulement ce fait, mais il l'érige en postulat de base de la théorie.

Or c'est en contradiction flagrante avec le point de vue galiléen selon lequel la vitesse d'un mobile dépend du référentiel utilisé.

Pour illustrer cela, revenons à notre observateur emporté par le train à la vitesse de $v = 30\text{ m/s}$. Au lieu de tirer des coups de fusil, il allume une puissante source d'éclairage, autrement dit il projette des rayons lumineux à la vitesse $c = 300\,000\text{ km/s}$. D'après les formules de transformation de Galilée, un observateur lié au talus devrait mesurer une vitesse de la lumière égale à $c + v = 300\,000,030\text{ km/s}$ dans le sens de la marche du train et $c - v = 299\,999,970\text{ km/s}$ dans le sens opposé, ce qui contredit les lois de l'électro-magnétisme de Maxwell, selon lesquelles il devrait mesurer la *même vitesse c dans n'importe quelle direction*. L'électromagnétisme n'était donc pas adapté à la conception galiléenne de l'espace et du temps.

Il a cependant fallu attendre trente-cinq ans pour que les physiciens, sous l'impulsion d'Einstein, renoncent enfin à l'éther bien-aimé et au principe d'addition des vitesses.

Du point de vue du formalisme mathématique, ce qui change donc lorsqu'on passe de la relativité galiléenne à la relativité restreinte, sont les formules de transformation d'un référentiel inertiel à un autre : les formules de Galilée cèdent la place aux *formules de Lorentz*, qui conservent les équations de Maxwell. L'essentiel de la relativité restreinte s'énonce ainsi : « Les lois de la nature sont invariantes par les transformations de Lorentz. » La loi d'addition des vitesses :

$$w = v + v' \quad (1)$$

est remplacée par :

$$w = \frac{v + v'}{1 + \frac{v + v'}{c^2}} \quad (2)$$

qui préserve bien le caractère absolu de c .

À ce stade le lecteur s'insurgera peut-être en se disant que les expériences ci-dessus ne peuvent fournir d'autres résultats que 830 m/s et - 770 m/s, obtenus par la formule (1). Le trouble est levé si l'on remarque que la formule (2) ne donne un résultat sensiblement différent de la formule (1) que si les vitesses entrant en jeu sont extrêmement élevées, largement supérieures aux vitesses humaines. (L'effet « relativiste » ne devient sensible que pour des vitesses dépassant 150 000 km/s !) Même si l'on considère la vitesse de la Terre autour du Soleil, 30 km/s, déjà grande à notre échelle, la correction apportée par la formule (2) n'est que de 1/10 000. C'est bien la raison pour laquelle la mécanique classique newtonienne avait jusqu'alors paru parfaitement adaptée à la description des phénomènes dynamiques et qu'elle continue aujourd'hui encore de donner d'excellents résultats dans toutes les expériences ordinaires de physique où l'on ne rencontre pas des vitesses très élevées : la relativité galiléenne est bien la limite de la relativité restreinte lorsque les vitesses sont faibles devant la vitesse de la lumière c .

La théorie la mieux vérifiée de la physique

Au début du siècle, on ne voyait guère les progrès pratiques que cette nouvelle théorie pouvait apporter aux hommes. L'important était le bouleversement des idées sur l'espace et le temps enracinées depuis des millénaires dans la mentalité humaine. Les formules de Lorentz mettent en effet en évidence une variation du temps et des longueurs avec la vitesse du référentiel, prouvant que l'idée de temps absolu et d'éther était un leurre. Sur ce point précis, Einstein répondait parfaitement aux questions soulevées par les célèbres expériences de Michelson et Morley.

En 1887, ces deux savants avaient réalisé une expérience tendant à mesurer la vitesse « absolue » de la Terre, c'est-à-dire sa vitesse dans l'éther – puisque l'éther régnait encore à cette date. L'expérience avait eu un résultat négatif : notre planète avait une vitesse nulle dans l'éther, chose inexplicable jusqu'à ce que l'on abandonne avec Einstein l'idée d'éther. Il est d'ailleurs curieux de constater que bon nombre de théoriciens de l'époque avaient pris conscience de l'impasse dans laquelle se trouvait la physique à l'aube du XX^e siècle, certains même en pressentaient les raisons profondes, comme Henri Poincaré. Il

fallait un homme à l'esprit entièrement neuf et hors des circuits scientifiques officiels pour oser faire table rase de tous les préjugés galiléens : cet homme fut Einstein. (Contrairement à l'opinion couramment répandue, ce n'est pas l'expérience de Michelson et Morley seule qui a incité Einstein à élaborer la relativité restreinte, mais les raisons plus épistémologiques que j'ai tenté de mettre en évidence ; pour Einstein, l'expérience ne faisait que confirmer sa propre vision de l'espace et du temps.)

Expérimentalement, la relativité restreinte est peut-être la théorie la mieux vérifiée de toute la physique. Elle régit notamment le domaine immense de la physique des particules, où les vitesses sont très grandes et, chaque jour, les accélérateurs de particules mettent en évidence les effets particuliers prévus par elle.

On peut ainsi littéralement « photographier » la relativité restreinte dans une chambre de Wilson, appareil permettant de visualiser les trajectoires des particules élémentaires.

Une conséquence particulièrement célèbre de la relativité restreinte est la formule $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$, exprimant l'énergie totale d'une particule en fonction de sa masse au repos m et de son impulsion p . Expression qui se simplifie dans la fameuse formule $E = mc^2$ quand la particule est immobile. Ainsi, un corps au repos qui émet de l'énergie le fait aux dépens de sa masse au repos : le Soleil transforme chaque seconde quatre millions de tonnes de matière en énergie de rayonnement. Les réacteurs nucléaires fonctionnent également sur ce principe, sans oublier, hélas ! les bombes atomiques.

Le phénomène de « dilatation des durées » est également très bien vérifié avec les mésons cosmiques, particules élémentaires en provenance de l'espace qui sont assez rapides pour que leur durée de vie en vol soit cinquante fois plus longue qu'au repos.

Toutes ces expériences et de nombreuses autres qui corroborent chaque jour le principe de relativité restreinte lui confèrent un statut privilégié au sein des lois physiques, l'érigeant en une sorte de « super-loi » à laquelle toute théorie nouvelle doit être assujettie.

Le tour de force d'Einstein

Le lien entre la relativité galiléenne et la relativité restreinte est le principe de relativité. Le lien entre la relativité restreinte et la relativité générale est d'une autre nature : c'est le *principe d'équivalence*.

La relativité générale a été conçue en vue de décrire les phénomènes de gravitation. On peut d'ores et déjà remarquer que la théorie de la gravitation de Newton, la célèbre théorie de l'attraction universelle, supposait l'existence d'une « action instantanée à

distance » entre tous les corps, et cette seule idée était déjà en contradiction avec la limitation imposée par l'électromagnétisme et la relativité restreinte sur la vitesse de propagation de signaux physiques. Mais après tout, la mécanique newtonienne pouvait se passer de ce concept d'action à distance, et les raisons pour lesquelles Einstein a édifié sa théorie de la gravitation sont beaucoup plus profondes – et cette fois solitaires – car elles sont fondées sur le principe d'équivalence. Que nous dit ce principe ? Tout simplement que *le rapport entre la masse inertielle d'un corps et sa masse gravitationnelle est une constante universelle*, indépendante notamment de la nature du corps, si bien que l'on peut identifier ces deux masses.

Éclaircissons chacun des termes de cette proposition. Tout le monde connaît la formule $F = mg$ exprimant qu'un corps de « masse » m soumis à une force F acquiert une accélération g . En d'autres termes, la masse m mesure la réponse du corps à la sollicitation de n'importe quelle force extérieure ; c'est la *masse inertielle* du corps, m_I . D'autre part, les lecteurs connaissent aussi la formule $P = mg$ qui ne fait qu'exprimer la « pesanteur » d'un corps de « masse » m soumis à l'accélération de la pesanteur g .

Il faut bien voir qu'il n'existe aucune raison *a priori* pour que cette masse gravitationnelle m_G soit la même que la masse inertielle m_I . Par conséquent, le principe d'équivalence identifiant m_G et m_I est un résultat très fort et profond. Il avait déjà été vérifié expérimentalement par Galilée ; les expériences d'Eötvös au XIX^e siècle et plus récemment de R. H. Dicke confirment cette identité avec une précision de un millièmè de milliardièmè, ce qui constitue l'une des mesures les plus précises de toute la physique. Il faut donc en tenir compte si l'on veut élaborer une théorie de la gravitation.

Revenons alors aux années 1905-1915. La relativité restreinte venait de s'imposer aux physiciens. Mais Einstein lui-même n'était pas satisfait de sa propre théorie, étant le seul à percevoir une inadéquation fondamentale entre le principe de relativité restreinte et le principe d'équivalence. En effet, si $m_G = m_I$, tous les corps sont accélérés dans un champ gravitationnel et il est impossible de construire localement des référentiels inertiels fixes par rapport aux étoiles, ce qui semble invalider le premier principe.

À une époque où les autres physiciens n'avaient même pas encore soupçonné l'existence d'une telle contradiction, le tour de force d'Einstein fut de renoncer à sa première théorie de la relativité, désormais qualifiée de « restreinte », au profit d'une théorie plus générale rendant compte des phénomènes gravitationnels et qui réconcilie les deux principes antagonistes ; la relativité restreinte n'est plus qu'une *théorie locale*, valide seulement dans les régions de l'espace-temps où le champ de gravitation est nul ou bien uniforme.

En relativité générale, c'est *la structure même de l'espace-temps qui est affectée* par les champs gravitationnels, donc par la simple présence de matière, et cette subordination de l'espace-temps aux phénomènes physiques constitue l'une des avancées les plus spectaculaires de la pensée scientifique. Dans toutes les autres théories de la physique, l'espace-temps est un cadre fixe et immuable au sein duquel se déroulent les phénomènes ; c'est une sorte d'éther à quatre dimensions un peu plus sophistiqué que l'ancien. Selon la relativité générale, la structure de l'espace-temps est « couplée » avec les lois régissant les mouvements des corps. En termes techniques, l'espace-temps de la relativité générale n'est plus « plat », euclidien, mais possède une *courbure* (Einstein utilisait ainsi les célèbres géométries non euclidiennes que le mathématicien Riemann avait imaginées dès 1850 sans aucun espoir d'application.)

En 1882, Albert Michelson construit un interféromètre capable de détecter de très petites variations dans la vitesse de la lumière. Cet appareil est constitué de deux tubes d'égale longueur le long desquels on dirige des rayons de lumière. Michelson pointe le premier tube dans la direction du mouvement de la Terre et l'autre à angle droit. Le mouvement de la Terre à travers l'« éther » doit, selon les théories admises, se traduire par un accroissement de la vitesse de la lumière par rapport à la Terre lorsqu'elle se propage en sens opposé à celui du mouvement de la Terre. On ne peut mesurer la vitesse à laquelle la lumière va d'un bout du tube à l'autre mais ce qui peut être déterminé c'est la différence de temps nécessaire à un faisceau pour parcourir des trajets égaux dans différentes directions. Un faisceau qui se propage dans le sens du mouvement de la Terre parviendra à la fin du tube un peu plus tard que dans l'autre tube. Le retour prend un peu moins de temps, mais le retard dû, à l'aller, n'est pas entièrement compensé. Donc, le faisceau qui parcourt le tube longitudinal prend un peu plus de temps pour effectuer un aller-retour que le faisceau qui suit le tube latéral. Ce retard peut être détecté, pour autant que le mouvement de la Terre affecte réellement la vitesse de la lumière par rapport à la Terre. L'expérience ne fut pas concluante : la lumière est donc indépendante du mouvement de la Terre à travers l'éther.

Dès lors, tout s'éclaire à la lumière du principe de relativité généralisé. De même que tout corps placé dans un champ de

gravitation prend un mouvement accéléré, tout corps animé d'un mouvement accéléré se comporte comme s'il était au repos dans un champ de gravitation G , et ce quelle que soit la nature de la force à laquelle il est soumis.

L'équivalence s'étend ainsi à tous les référentiels, qu'ils soient accélérés ou non, si l'on tient compte de ce facteur de gravitation G .

L'exemple favori d'Einstein est celui d'un ascenseur ; sur Terre, un référentiel inertiel dans le champ de pesanteur terrestre est un ascenseur en chute libre !

On voit que si la relativité restreinte est strictement valide en l'absence de tout champ gravitationnel, elle le reste aussi dans toute région de l'espace-temps suffisamment petite pour que le champ gravitationnel reste uniforme (ce qui est le cas sur Terre), et c'est donc bien une théorie uniquement locale.

En relativité générale, la vision profonde des phénomènes physiques est changée. Pour donner un exemple concret, on sait qu'en théorie newtonienne on considère que les planètes décrivent des ellipses autour du Soleil parce qu'elles sont soumises à une force d'attraction centrale. Avec Einstein, on dira désormais que les planètes se déplacent *librement dans un certain espace courbe*. De même que dans l'espace-temps sans courbure de la relativité restreinte les particules libres décrivent des lignes droites, qui sont les plus courtes distances pour aller d'un point à un autre, dans un espace-temps courbe elles décrivent des « géodésiques », qui sont aussi des chemins de longueur minimale entre deux points mais ne sont plus des droites.

On montre ainsi que dans la géométrie dite de *Schwarzschild*, qui décrit l'espace-temps à l'extérieur d'un corps sphérique massif (par exemple notre Soleil), les géodésiques sur lesquelles se déplacent les planètes ne sont autres que les ellipses képlériennes. Mais un phénomène nouveau apparaît : en raison de la déformation de l'espace due à la présence du Soleil, le périhélie des planètes doit peu à peu « avancer », l'effet étant bien sûr plus grand pour les planètes les plus proches du Soleil comme Mercure ou Vénus.

Le phénomène avait été observé avant 1915 sur Mercure mais n'avait pas reçu d'interprétation correcte en théorie newtonienne ; la théorie d'Einstein prévoit au contraire cette avance du périhélie (même pour Mercure, l'effet reste très faible : 43 " par siècle), et ce fut la première vérification expérimentale de la relativité générale.

On parvient ici à un point fondamental : les effets prévus par la relativité générale restent très faibles et limités dans le champ du système solaire, en raison du fait que l'interaction gravitationnelle est de très loin la plus faible. Pour donner une idée, le rapport entre l'intensité de l'interaction électrostatique entre deux protons et leur interaction gravitationnelle est de 10^{36} , et de plus le champ

gravitationnel solaire est relativement petit. La précession du périhélie des planètes est l'un des effets mesurables ; il en existe principalement deux autres que l'on a pu mettre en évidence dans le système solaire. Le premier est la déviation des rayons lumineux au voisinage du Soleil ; selon la relativité générale, les trajectoires des rayons lumineux s'infléchissent en passant près du Soleil. Einstein avait calculé théoriquement cette déviation, qui fut confirmée expérimentalement en 1919 par Eddington lors d'une éclipse de Soleil. Ce fut une autre vérification éclatante de la théorie. Le dernier effet est le déplacement des fréquences des raies spectrales vers le rouge dans un champ de gravitation ; il a été mesuré dans le champ de pesanteur terrestre au moyen de l'effet Mössbauer.

Dans son ouvrage *M. Tompkins au pays des merveilles*, G. Gamow donne, selon Albert Einstein, « une explication extraordinaire et amusante de la théorie quantique, de la relativité et de l'espace-temps à quatre dimensions, racontée par l'intermédiaire des cauchemars d'un employé de banque ». On est transporté dans un monde imaginaire où la vitesse de la lumière serait de 15 km/h environ tandis que les autres constantes universelles garderaient leur valeur habituelle. M. Tompkins emprunte une bicyclette. « L'aspect du paysage changea complètement. Les rues devinrent plus courtes, les devantures des boutiques se mirent à ressembler à des fentes étroites et l'agent du coin se trouva être l'homme le plus mince qu'il ait jamais vu. "Ah ! je comprends le truc", s'exclama M. Tompkins très excité. C'est de là que vient le mot relativité. Tout ce qui est mobile par rapport à moi devient plus petit pour moi, peu importe qui fait tourner les pendules. » Ainsi les personnages sur le dessin apparaissent incroyablement aplatis, illustrant ainsi la contraction des longueurs. On sait maintenant que des objets dotés de vitesses proches de celle de la lumière ne prendraient pas dans une observation visuelle, si l'on fait intervenir tous les effets de la relativité d'Einstein, un aspect contracté, mais paraîtraient avoir subi une simple rotation.

Marginale et discutée

Malgré la beauté profonde de la relativité générale, elle a longtemps occupé une position marginale au sein de la physique, et sa valeur continue encore d'être discutée. Cela tient précisément à la

grande rareté des tests expérimentaux.

Il y a bien la cosmologie relativiste, qui propose des modèles d'univers satisfaisant les équations de la relativité générale et par lesquels on interprète les résultats observationnels accumulés depuis cinquante ans. Ainsi, le phénomène de récession des galaxies découvert par Hubble trouve une explication simple dans un modèle d'univers relativiste en expansion au cours du temps, et la découverte en 1965 du rayonnement cosmologique à 3 K s'interprète comme le résidu de l'explosion primordiale dont serait né l'Univers il y a environ douze milliards d'années, conformément à un modèle cosmologique précis calculé avec la théorie d'Einstein et auquel s'accordent pratiquement toutes les autres observations. Mais certains physiciens, et non des moindres, continuent de considérer la cosmologie non comme une science, mais comme un mythe pur et simple.

On peut se demander en dernière analyse si ce n'est pas l'avènement de l'*astrophysique relativiste* qui permettra de trancher le débat.

Celle-ci est une branche de l'astronomie qui recouvre l'étude de toutes les situations dans lesquelles les énergies entrant en jeu sont si élevées que la théorie newtonienne est inadéquate et que seule la relativité générale permet d'interpréter les phénomènes. De telles situations se rencontrent en particulier dans les très forts champs gravitationnels associés à d'énormes concentrations de matière.

Jusqu'au début des années 1960, les domaines d'application de la relativité générale à l'astrophysique étaient restés la chasse gardée d'un petit nombre de théoriciens. Cette époque a coïncidé avec la découverte observationnelle d'objets astronomiques « exotiques » tels que pulsars, sources X binaires, radiogalaxies, quasars, etc. Pour de telles sources, on a dû admettre que les phénomènes énergétiques mis en jeu s'expliquaient difficilement sans faire intervenir la libération d'énergie gravitationnelle prévue par la relativité générale dans les champs gravitationnels importants, mécanisme beaucoup plus efficace que la libération d'énergie thermonucléaire bien connue qui gouverne le fonctionnement des étoiles ordinaires.

Les quasars sont des noyaux de galaxies très lointaines, dont la taille est très réduite (disons de la taille du système solaire), mais qui rayonnent une luminosité colossale, pouvant atteindre quatre cent mille milliards de fois la luminosité du Soleil ! Pour expliquer ce phénomène, nombre d'astrophysiciens ont dû supposer la présence de gigantesques concentrations de matière au sein des quasars, créant un champ gravitationnel si énorme que toute la matière environnante, gaz ou étoiles entières, est aspirée, « accrétée » par le puits gravitationnel en libérant de façon spectaculaire de prodigieuses quantités de rayonnement, à un taux calculable par la relativité

générale. Or cette même théorie prévoit qu'en certaines régions de l'espace-temps, le champ gravitationnel pourrait être si élevé qu'aucune particule ne pourrait s'en échapper, pas même les rayons lumineux ; ces régions sont les fameux *trous noirs* dont l'imagination populaire s'est déjà emparée. Physiquement, les trous noirs seraient des corps extrêmement compacts : si l'on parvenait à réduire la Terre entière à la taille d'une bille de huit millimètres de rayon, alors elle serait un trou noir ! La formation d'objets aussi denses, où la matière est si « serrée », peut s'expliquer dans le cadre de l'évolution stellaire traditionnellement admise : les trous noirs de masse stellaire (disons dix fois la masse du Soleil) représentent l'étape ultime de l'évolution des étoiles dites « massives » (dix à cinquante fois la masse du Soleil) ; celles-ci ont une durée de vie plus courte que les étoiles moins massives comme notre Soleil, et la théorie prévoit que lorsqu'elles ont épuisé leur « carburant » thermonucléaire, elles commencent à se contracter sous l'effet de leur propre champ gravitationnel qui n'est plus dès lors compensé par la pression thermique au sein de l'étoile. Pour ces étoiles massives, il semble que cet effondrement gravitationnel ne puisse donner autre chose que des trous noirs. On a montré qu'il pouvait vraisemblablement se former aussi des trous noirs géants de plusieurs millions de fois la masse du Soleil, et c'est à ces trous noirs supermassifs que l'on a songé pour expliquer le phénomène des quasars. Bien des travaux restent encore à faire et des preuves à apporter, ne serait-ce que la détection réelle de trous noirs, mais cet exemple montre combien les progrès de l'observation astronomique peuvent apporter à la relativité générale.

Pour autant, rien n'interdit de penser que d'autres théories de la gravitation (mais nécessairement basées sur le même principe d'équivalence) supplanteront un jour la relativité générale, en montrant que cette dernière n'était applicable que dans un cas limite, par exemple les champs gravitationnels pas trop élevés. La relativité générale est en ce sens moins bien établie que la relativité restreinte, laquelle est « matérialisée » par les réacteurs nucléaires et dans les accélérateurs de particules.

Depuis 1915, d'autres théories de la gravitation ont vu le jour, mais la relativité générale est probablement la seule qui ait résisté victorieusement à toutes les observations et acquisitions astronomiques du siècle.

Corrigée dans les détails

Devant le faisceau convergent de toutes ces observations, il devient de plus en plus vraisemblable que si la relativité générale doit être corrigée, ce ne peut être que dans des détails assez minimes, voire

purement conceptuels. Une tendance de la physique actuelle consiste à vouloir unifier les quatre interactions fondamentales connues dans la nature, à savoir les interactions nucléaires forte et faible, l'électromagnétisme et la gravitation, en dégéométrisant radicalement la relativité générale et en l'interprétant comme une théorie de « jauge ». Pendant trente ans, Einstein lui-même avait tenté sans succès de réaliser ce projet ambitieux, mais dans une voie complètement opposée : il avait voulu géométriser les trois autres interactions.

J'ai dit « vraisemblable » et non pas certain. Si par exemple, au cours des vingt prochaines années, l'observation astronomique révélait avec certitude que les trous noirs n'existent pas dans l'Univers, nous nous trouverions à peu près dans la même situation que les physiciens du XIX^e siècle après l'expérience de Michelson et Morley ; les trous noirs semblent une conséquence inéluctable de la relativité générale au même titre que l'éther était une conséquence de la relativité galiléenne. Toutefois, alors qu'à la fin du XIX^e siècle bon nombre de physiciens, tels que Lorentz, Minkowski ou Poincaré, entrevoyaient déjà la théorie nouvelle, à l'heure actuelle on n'a pratiquement aucune idée sur ce que pourrait être une théorie différant sensiblement de la relativité générale.

Une telle observation « négative » des trous noirs constituerait en tout cas une bien plus grande révolution scientifique qu'une observation « positive », laquelle mobilise actuellement bon nombre d'astrophysiciens.

La relativité générale, et au-delà¹

De l'attraction universelle à l'espace-temps courbe

Un jour, le peuple des papillons décide de tenir une grande assemblée pour tenter de résoudre une énigme qui les tourmente : la nature de la flamme. Chaque savant papillon expose sa propre théorie, mais aucune n'est convaincante. Alors, le sage qui préside l'assemblée fait remarquer que la meilleure façon de répondre à la question est d'aller voir une flamme de plus près. Un premier papillon se porte volontaire ; il s'envole en direction du château le plus proche, passe devant une fenêtre ouverte et aperçoit de l'autre côté la lueur d'une bougie. Très excité, il revient parmi ses camarades et raconte ce qu'il a vu. Le sage papillon dit : « Ton récit ne nous apprend pas grand-chose. » Un deuxième papillon s'élance vers le château, franchit la fenêtre et frôle la flamme. Les ailes roussies, il revient tant bien que mal et, surexcité, raconte son expérience. Le sage papillon dit : « Ton récit ne nous apprend rien de plus. » Alors un troisième papillon, ivre de connaissance, s'élance vers le château, franchit la fenêtre, se précipite dans la flamme et fait corps avec elle. Il s'embrase aussitôt et disparaît, sans pouvoir relater son expérience. Le sage papillon, qui avait observé la scène de loin, dit alors à ses camarades : « Eh bien, voilà, notre ami connaît désormais la nature de la flamme, mais lui seul la comprend, et il n'y a rien de plus à apprendre. »

Ce vieux conte persan est une métaphore de l'un des mystères les plus fascinants auxquels sont confrontés les astrophysiciens modernes : celui des trous noirs. Cependant, je ne développerai pas davantage ce sujet : si j'ai voulu introduire mon exposé par cette métaphore, c'est parce que l'existence des trous noirs s'avère une conséquence inéluctable de la relativité générale d'Einstein. Cette théorie constitue, avec la physique quantique, l'un des deux piliers de la physique moderne. Elle continue cependant à être ignorée, non seulement du public et de ce qu'il est convenu d'appeler les « intellectuels », mais même de la plupart des physiciens. Il est vrai qu'elle pose une interrogation fondamentale sur la nature de l'espace et du temps, et

sur leurs rapports avec la gravité, la matière et la lumière.

De telles interrogations sur la nature physique de l'Univers ne datent pas d'aujourd'hui. À la fin du XVII^e siècle, Isaac Newton avait déjà voulu établir une vision formelle de l'espace et du temps. Selon ses propres termes (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 1687) : « Le temps absolu, vrai et mathématique, qui est sans relation à quoi que ce soit d'extérieur, en lui-même et de sa nature coule uniformément ; et ce flot continu et uniforme du temps s'appelle la durée. » Quant à l'espace, Newton le définit également comme « absolu, sans relation à quoi que ce soit d'extérieur et, de par sa nature, demeure toujours semblable et toujours immobile ». Le schéma que Newton proposait de l'Univers consistait donc en un cadre préétabli et figé, c'est-à-dire un espace et un temps posés *a priori*, mathématisés en termes de la géométrie euclidienne. L'espace newtonien est infini, sans courbure ; le temps est éternel. Au sein de ce cadre immuable se meut la matière, découplée de l'espace et du temps. Qu'est-ce qui la fait mouvoir ? Des forces qui agissent sur elle, répondit Newton. Par exemple, la force d'attraction universelle, qui fait graviter les corps célestes, les forces d'inertie responsables de la dynamique des corps ($f = m\gamma$), les forces d'action-réaction, etc.

Par ses nouvelles capacités à expliquer et à prédire les phénomènes physiques, la conception newtonienne de l'Univers a été couronnée de tant de succès qu'elle s'est imposée pendant plus de deux siècles. Au début du XX^e siècle, de nouvelles interrogations ont toutefois vu le jour. À l'issue d'une réflexion profonde portant à la fois sur l'interprétation de certaines expériences relatives à la vitesse de la lumière (conduites par Michelson et Morley) et sur des considérations théoriques concernant l'électromagnétisme de Maxwell, Albert Einstein, Henri Poincaré et quelques autres théoriciens furent conduits à bâtir une nouvelle physique : la relativité.

Les lois physiques s'élaborent à l'aide d'invariants, c'est-à-dire des quantités qui sont indépendantes du référentiel. Dans la physique newtonienne, les intervalles d'espace et les intervalles de temps font office d'invariants : quantités absolues, longueurs et durées sont indépendantes de la position et de la vitesse des observateurs. La relativité propose deux nouveaux invariants :

- la vitesse de la lumière dans le vide, qui reste la même pour tout observateur, quel que soit son mouvement,

- l'intervalle spatio-temporel, combinaison algébrique des intervalles d'espace et de temps. Cette dernière quantité nécessite l'introduction d'une structure géométrique à quatre dimensions, l'espace-temps, qui couple l'espace et le temps par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière.

Ces deux nouveaux invariants permettent de reformuler les lois

de la mécanique et de l'électromagnétisme de façon cohérente au sein de la relativité restreinte (1905). La conséquence la plus immédiate est que l'espace et le temps sont désormais « élastiques », en ce sens que les longueurs et les durées dépendent de la vitesse relative entre l'observateur et le système mesuré : quand la vitesse relative augmente et tend vers celle de la lumière, les longueurs se contractent, les durées se dilatent, et l'énergie augmente indéfiniment. Ces phénomènes, *a priori* surprenants pour le sens commun, ont été vérifiés expérimentalement avec une grande précision.

Une autre caractéristique de la relativité restreinte est la disparition de la notion de « simultanéité » entre événements ; en effet, puisqu'il n'y a plus de temps unique et universel, valable pour tous les observateurs, il devient impossible de décider de manière absolue que deux événements sont simultanés : s'ils peuvent l'être dans un référentiel, ils ne le sont plus dans un autre.

Toute la richesse de la nouvelle structure causale de l'espace-temps relativiste s'exprime à travers les « cônes de lumière » ; à partir d'un événement donné de l'espace-temps, le cône de lumière définit une région accessible (elle-même séparée en passé et en futur) et une région inaccessible, à savoir un « ailleurs » dans lequel aucune trajectoire de particule matérielle ne peut se dérouler – simple conséquence du fait qu'il ne peut y avoir d'action à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide.

La relativité restreinte ne décrit toutefois pas correctement l'univers physique, car ce dernier étant rempli d'astres possédant de la masse, il est gouverné à grande échelle par la gravitation ; or la gravitation n'est pas prise en compte par la relativité restreinte.

Que pensait-on de la gravitation à l'époque de Newton ? Considérez un corps massif et des trajectoires de particules circulant dans son voisinage. Selon que les particules passent plus ou moins près du corps massif, leurs trajectoires sont plus ou moins déviées par rapport à la ligne droite. Il est donc tentant – et c'est ce que fit Newton – de supposer l'existence d'une force émanant de tous les corps massifs, qui dévie et incurve les trajectoires des corps matériels. La mécanique céleste s'explique ainsi par une force d'attraction universelle.

En 1915, Einstein a proposé un tout autre schéma de la gravitation : la théorie de la relativité générale. La conception newtonienne des forces d'attraction gravitationnelle est remplacée par une description purement géométrique, en termes de courbure de l'espace-temps. Les mathématiques non euclidiennes, développées au XIX^e siècle sous l'impulsion notamment de Lobatchevski et de Riemann, permettent précisément de concevoir et de construire des espaces courbes.

Visualisons un morceau d'espace-temps fortement incurvé par la présence d'un corps massif – par exemple un trou noir. La masse induit une déformation du tissu élastique de l'espace-temps, en y creusant un véritable « puits gravitationnel ». Dans cette représentation, le concept de force gravitationnelle devient inutile : les particules, les planètes ou les comètes ne sont soumises à aucune force ; elles se contentent d'épouser la forme incurvée du tissu. Il est intéressant de voir à quel point la description relativiste induit un changement du niveau de compréhension de la réalité physique. Les notions newtoniennes de force, d'espace absolu, de temps absolu, s'évanouissent en fumée, telles des illusions. Elles ne sont que la projection, une « vision en coupe » d'une réalité plus profonde, celle d'un espace-temps élastique déformé par les corps massifs.

Avec la relativité générale, il faut donc abandonner le cadre d'espace et de temps fixé *a priori*, au profit d'une entité plus subtile mais plus complexe, qui marie, d'une certaine façon, l'espace, le temps, la matière et la lumière par l'intermédiaire de la gravité. La physique relativiste s'applique aussi bien à la description du système solaire qu'à celle de la galaxie ou de l'Univers dans son ensemble. Les équations de Newton sont remplacées par celles d'Einstein, qui explicitent la stricte correspondance entre la géométrie de l'espace-temps et la distribution de la matière (plus précisément de l'énergie). La matière épouse la géométrie de l'espace-temps, et la courbure de l'espace-temps dicte les trajectoires de la matière.

Au-delà de son élégance formelle, la théorie de la relativité générale n'a pu être adoptée qu'après être passée sous les fourches caudines des vérifications expérimentales. Nombreux parmi vous sont ceux qui attendent avec impatience l'éclipse du 11 août 1999, qui va balayer le nord de la France. Au regard des théories einsteiniennes sur l'espace-temps, les éclipses semblent des phénomènes quelque peu anodins, parce qu'elles ne concernent que trois corps du système solaire – la Terre, la Lune, le Soleil –, c'est-à-dire une infime portion de l'Univers. C'est pourtant grâce à une éclipse que la théorie de la relativité générale a pu être mise pour la première fois à l'épreuve de l'expérience. En 1919, l'une des prédictions spécifiques de la théorie relativiste, à savoir que les trajectoires des rayons lumineux passant au voisinage du Soleil devaient être déviées d'un certain angle, a été mesurée lors d'une éclipse totale de Soleil observée au Brésil et en Afrique. De nos jours, grâce au perfectionnement des très grands télescopes qui permettent de sonder les confins de l'Univers, les effets de courbure de l'espace-temps sont observés de façon encore plus spectaculaire dans les « mirages gravitationnels ». Par exemple, l'un d'entre eux a la forme d'un trèfle à quatre feuilles, dont les quatre pétales sont les images multiples d'un seul et même objet – une

galaxie extrêmement lointaine, située à l'arrière-plan d'une galaxie visible au centre du trèfle. Placée sur la ligne de visée, cette galaxie intermédiaire déforme l'espace dans son voisinage, dévie les trajectoires des rayons lumineux qui traversent son puits gravitationnel, et crée un mirage qui démultiplie, distord et amplifie les images des galaxies d'arrière-plan.

Les Nobel relativistes

Si Albert Einstein s'est vu attribuer le prix Nobel de physique en 1921, ce n'est pas pour ses théories de la relativité restreinte ou générale, mais pour ses travaux concernant l'effet photoélectrique. La relativité générale a en effet suscité beaucoup d'opposition durant de nombreuses années, l'une d'entre elles venant de ce qu'elle ne pouvait être testée avec précision que dans un champ gravitationnel fort, dans des conditions très éloignées de celles qui règnent non seulement au laboratoire, mais également dans le système solaire. Il a fallu attendre certains développements de l'astrophysique théorique et observationnelle pour que la relativité générale puisse commencer à être testée en champ fort.

Dans l'histoire des prix Nobel de physique, trois d'entre eux ont été attribués à des chercheurs ayant travaillé sur des conséquences fondamentales de la relativité générale².

L'une de ces conséquences est la compréhension des stades ultimes de l'évolution stellaire, qui conjugue de nombreuses avancées dans les domaines de la thermodynamique, de la physique nucléaire et de la relativité générale. La « mort » d'une étoile est provoquée par l'épuisement de son combustible thermonucléaire, et se traduit par l'effondrement gravitationnel de son noyau. Quel est le résultat de ce processus ? De nombreux physiciens et astronomes ont travaillé sur la question, en prenant en compte la relativité générale ; en effet, une étoile qui se contracte et s'effondre sur elle-même augmente considérablement sa puissance gravitationnelle, au point de creuser un puits de plus en plus profond dans le tissu élastique de l'espace-temps. Les découvertes et les modélisations successives des naines blanches, des étoiles à neutrons et des trous noirs ont conduit à un nouveau paysage fascinant décrivant les diverses phases de l'évolution stellaire. Elles ont valu en 1983 le prix Nobel de physique à Subramanyan Chandrasekhar.

Une autre conséquence fondamentale de la relativité générale est le rayonnement gravitationnel. Non seulement la présence d'un corps massif déforme localement le tissu élastique de l'espace-temps, mais son mouvement déplace la courbure. La façon dont celle-ci se déplace se traduit par des ondes – de la même façon qu'un caillou jeté dans un

étang induit des ondulations qui se propagent à la surface de l'eau. Ces « ondes gravitationnelles », résultant du déplacement à grande vitesse des corps massifs, se propagent à la vitesse de la lumière en faisant vibrer l'espace-temps sur leur passage. Les variations de courbure induites sont si infimes qu'elles sont extraordinairement difficiles à détecter. Pour l'heure, aucune onde gravitationnelle n'a été mise en évidence directement, mais des projets expérimentaux ambitieux, comme VIRGO ou LISA, sont en cours d'élaboration³. Le rayonnement gravitationnel a néanmoins été détecté de façon indirecte grâce à l'étude d'un couple d'étoiles à neutrons très particulier, le « pulsar binaire ». L'un des membres du couple, un pulsar, émet un signal radio extrêmement régulier. L'analyse détaillée de la période orbitale du couple a montré que celle-ci diminue au cours du temps ; en d'autres termes, le couple d'étoiles à neutrons se resserre peu à peu, à mesure qu'il perd de l'énergie orbitale. Cette perte d'énergie est correctement modélisée par une émission continue d'ondes gravitationnelles. La découverte et l'analyse expérimentale du pulsar binaire ont valu le prix Nobel de physique à Russell Hulse et Joseph Taylor, en 1993.

Une troisième conséquence de la relativité générale – sans doute la plus fondamentale – est la description de la structure de l'Univers dans son ensemble, c'est-à-dire la cosmologie. Que justice soit ici rendue au véritable inventeur des célèbres modèles de Big Bang, le Belge Georges Lemaître, oublié non seulement des comités Nobel, mais aussi de la plupart des physiciens. C'est lui qui, entre 1927 et 1931, a entièrement défini les bases théoriques et observationnelles de la cosmologie relativiste, et de ses solutions dites de Big Bang. Le Russe Alexandre Friedmann avait précédemment (1922-1924) découvert les solutions mathématiques de la relativité générale susceptibles de décrire des univers en expansion ou en contraction. Mais Lemaître a été le premier à faire le lien entre les observations du décalage vers le rouge systématique des galaxies et les calculs théoriques de la relativité. Il a montré qu'il fallait abandonner le concept d'univers statique au profit d'un univers dynamique, dans lequel l'espace évolue au cours du temps. Les modèles de Big Bang qui en résultent décrivent un univers en expansion perpétuelle, ralentie ou accélérée, ou un univers en expansion-contraction, selon les valeurs prises par un certain nombre de paramètres comme la densité moyenne de l'Univers et la constante cosmologique. Selon une découverte récente « sensationnelle », l'expansion de l'Univers s'accélérerait en raison d'une valeur assez élevée de la constante cosmologique. Or cette idée se trouve déjà dans des articles de Lemaître vieux de soixante ans. Il avait brossé un panorama général de toutes les solutions relativistes possibles, susceptibles de

représenter l'évolution à long terme de l'Univers, et il avait donné sa préférence à un modèle à courbure spatiale positive et en expansion perpétuelle accélérée. C'est précisément ce type de solution qui est privilégié par les mesures astronomiques les plus récentes. Lemaître a également été le premier à reconstituer « à l'envers » le film de l'évolution cosmique et à en déduire que, dans une phase passée mais pas si lointaine (quelques milliards d'années), l'Univers dans son ensemble a dû être très chaud et très dense. Ce qu'il appelait l'« atome primitif » a été rebaptisé du terme beaucoup plus populaire de Big Bang (qui ne traduit en rien une grande explosion originelle). En 1965, le vestige refroidi du Big Bang a été détecté sous la forme d'un rayonnement micro-ondes imprégnant tout le fond de ciel. La détection de ce rayonnement de fond cosmologique a valu le prix Nobel à Arno Penzias et Robert Wilson, en 1978.

Écume de l'espace-temps et univers chiffonnés

La relativité générale, malgré les aperçus extrêmement novateurs qu'elle donne sur la nature de l'Univers, ne nous conduit pas « au-delà » de l'espace et du temps. Certes, elle s'affranchit des concepts d'espace et de temps considérés comme des entités absolues ; mais elle suppose toujours l'existence d'une solide structure spatio-temporelle, enracinée dans la matière et la lumière. Pour s'aventurer au-delà de l'espace et du temps, il faut dépasser la relativité générale. Cela a-t-il un sens ? Oui, car, si la relativité générale a passé avec succès un certain nombre d'épreuves expérimentales, elle est incomplète, à l'instar de toute théorie physique. L'une de ses limites de validité est bien connue : la relativité générale ne prend pas en compte les propriétés microscopiques de la matière, décrites par la physique quantique. Einstein en avait conscience puisque, après la mise au point de sa théorie gravitationnelle, il a passé le restant de ses jours à tenter d'unifier la gravitation avec les autres interactions physiques – en vain. Les tentatives actuelles d'unification, qu'il s'agisse de « cordes », de « supergravité » ou de « cosmologie quantique », se heurtent d'ailleurs aux mêmes difficultés. Ce qui est moins connu, c'est que la relativité générale est aussi incomplète à grande échelle : l'espace est-il fini ou infini, orienté ou non ? Quelle est sa forme globale ? La gravitation ne décide pas seule de la forme de l'espace. La « topologie cosmique » tente de pallier cette incomplétude.

En ce qui concerne la limite de la relativité générale à petite échelle, différents scénarios ont été proposés pour tenter de résoudre la difficulté. L'un d'entre eux, poétiquement baptisé « écume de l'espace-temps », a été suggéré dans les années 1960 par John Wheeler. Dans cette conception, la vraie structure de l'espace-temps

peut être comparée à la surface d'un océan agité. Si vous survolez l'océan à haute altitude, vous n'en distinguez que la surface lisse et plane, parce que vous manquez de résolution. Si vous vous rapprochez, vous commencez à voir apparaître les vagues, les creux et les bosses, mais la surface reste mathématiquement simple à décrire ; elle est notamment continue. En revanche, si vous vous trouvez à la surface même de l'océan, c'est-à-dire avec un degré de résolution maximum, vous découvrez une structure extraordinairement compliquée. Compliquée dans l'espace, car celui-ci n'est même plus d'un seul tenant : des gouttes d'écume se détachent. Sa structure est également très compliquée dans le temps, car elle fluctue en permanence. La vraie nature de l'espace-temps pourrait être analogue à cet océan bouillonnant, dont la structure ne pourrait toutefois être perçue qu'à une échelle de résolution extraordinairement fine, de l'ordre de 10^{-33} centimètre (échelle caractéristique appelée longueur de Planck).

Dans ce nouveau cadre théorique, des scénarios de « cosmogenèse quantique » ont vu le jour, susceptibles de résoudre certains problèmes posés par les modèles classiques de Big Bang – notamment le problème du « temps zéro », début absolu de l'Univers. En effet, à l'époque où les distances moyennes dans l'Univers étaient de l'ordre de 10^{-33} centimètre, l'espace-temps se réduisait à une écume bouillonnante d'énergie : le vide quantique. Ce concept issu de la physique quantique décrit l'état le plus stable qui soit, c'est-à-dire l'absence de toute particule, de tout champ d'interaction. Dans le vide quantique, il reste cependant de l'énergie, à un niveau minimum qui n'est pas nul. En vertu du principe d'incertitude de Heisenberg, cette énergie fluctue spontanément sur de courtes durées. Certains modèles de cosmogenèse quantique supposent que les fluctuations spontanées du vide quantique peuvent engendrer, non plus un seul univers, mais une infinité d'« univers-bulles », chaque univers ayant sa propre géométrie, sa propre dynamique, ses propres lois de la physique.

On le voit, la cosmologie quantique impose de refonder les concepts d'espace et de temps ainsi que leurs relations avec l'énergie. Selon la géométrodynamique de Wheeler, l'espace-temps quadridimensionnel doit être remplacé par le « superspace », c'est-à-dire un espace mathématique ayant un nombre infini de dimensions, dont chaque point est ce que nous appelons l'espace, c'est-à-dire une géométrie à trois dimensions. L'évolution de l'Univers au cours du temps n'est que la trajectoire d'un point dans le superspace. Chaque trajectoire du superspace est une histoire possible de l'Univers, affectée de telle ou telle probabilité qui se mesure par l'amplitude de la fonction d'onde de l'Univers. Ainsi, en essayant de considérer l'Univers dans son ensemble comme un système quantique, la

cosmologie quantique calcule les probabilités pour que telle ou telle histoire d'univers se déroule au sein du superspace. L'évolution de la fonction d'onde de l'Univers est régie par l'équation de Wheeler-de Witt, synthèse entre les équations d'Einstein de la relativité générale et l'équation d'ondes de Schrödinger de la mécanique quantique.

Une autre piste de recherches qui a actuellement la faveur de nombreux chercheurs est celle des « cordes ». Le concept peut faire dresser les cheveux sur la tête des physiciens expérimentateurs, car cette théorie n'est pas testable dans nos laboratoires, et ne le sera peut-être jamais, tant les énergies qu'elle met en jeu sont élevées. Ses concepts de base sont cependant fascinants. Elle consiste essentiellement à remplacer la notion de particule matérielle par une entité géométrique abstraite analogue à une corde vibrante. Une particule élémentaire serait décrite non plus par une bille matérielle quasi ponctuelle affublée de paramètres physiques tels que la charge, la masse, le spin, etc., mais par une corde infinitésimale, ouverte ou fermée, de longueur 10^{-33} centimètre, qui vibrerait selon des modes définissant les propriétés de la particule. Dans cette représentation, l'interaction entre deux particules qui échangent un photon se visualise, par exemple, par un changement de topologie de la corde représentant l'une des particules ; la corde forme une boucle qui se détache – le photon – et l'échange avec la deuxième corde-particule. Avec les cordes, on est obligé, pour des raisons techniques, d'introduire des dimensions supplémentaires à l'espace : la théorie n'est cohérente que dans des espaces à 10 ou 26 dimensions⁴. Où se trouvent ces dimensions supplémentaires, cachées dans la vie de tous les jours ? Elles seraient fortement enroulées sur elles-mêmes, selon un rayon de courbure de l'ordre de la longueur de Planck. Examinez un tuyau d'arrosage ; vu de très loin, le tuyau ressemble à une ligne ondulée, c'est-à-dire à un espace à une dimension. Si vous l'observez de près, avec la résolution adéquate, vous percevez le rayon de courbure du tuyau, et vous découvrez les deux dimensions supplémentaires qui vous avaient échappé à plus faible résolution. Notre espace physique pourrait être de cette nature : possédant 3 dimensions visibles à l'échelle macroscopique, et 7 ou 23 dimensions supplémentaires, fortement courbées, perceptibles seulement à la longueur de Planck.

La seconde incomplétude de la relativité générale concerne les très grandes échelles. La théorie d'Einstein ne peut pas nous dire quelle est la forme globale de l'espace, en particulier s'il est fini ou infini. Depuis les récentes (1999-2000) mesures expérimentales de la courbure moyenne de l'espace, on entend souvent des cosmologistes déclarer que l'espace cosmique est de courbure nulle, c'est-à-dire qu'il a une géométrie euclidienne, et qu'il est donc infini. De telles

affirmations sont abusives, et vraisemblablement fausses. En premier lieu, il est extrêmement improbable que l'espace cosmique soit strictement euclidien car, pour qu'il en soit ainsi, il faudrait que sa densité totale de matière-énergie soit exactement égale à une certaine « valeur critique » calculée par la théorie – qui, normalisée dans certaines unités, est égale à 1. Il est difficile d'imaginer comment, en combinant une densité de matière de l'ordre de 0,3 mesurée avec une incertitude de 10 à 20 %, et une constante cosmologique de l'ordre de 0,7 avec une incertitude expérimentale de 30%, on puisse en conclure que la somme est égale à 1 avec une précision infinie ! En réalité, l'espace est soit hyperbolique (de courbure constante négative) si sa densité d'énergie est inférieure un tant soit peu à la densité critique, soit elliptique (de courbure constante positive) dans le cas contraire.

En second lieu, même en admettant que l'espace soit exactement euclidien, il serait inexact d'en conclure qu'il est nécessairement infini. Les topologistes ont démontré qu'il existe dix-huit formes (topologies) différentes pour l'espace euclidien à trois dimensions, dix d'entre elles étant parfaitement finies ! Un exemple simple est l'hypertore, espace obtenu en prenant un bloc cubique d'espace euclidien et en collant les paires de faces opposées. Un tel espace reste euclidien (sa courbure reste nulle en chaque point), mais son volume est fini, aucune trajectoire ne pouvant s'éloigner indéfiniment de son point de départ. Quant aux espaces hyperboliques et elliptiques, leurs topologies sont en nombre infini, et aucune d'entre elles n'est *a priori* exclue pour la description de l'espace physique.

Une nouvelle discipline se développe donc depuis quelques années : la topologie cosmique. Elle applique aux solutions de la cosmologie relativiste les résultats de la topologie, cette branche de la géométrie qui classe les formes globales des espaces. Considérons par exemple un polyèdre – c'est-à-dire une figure construite par l'assemblage de faces polygonales, dont les côtés communs forment les arêtes du polyèdre et dont les points communs forment les sommets. La plupart des espaces tridimensionnels sont représentables sous forme de polyèdres convexes dont on a identifié convenablement les faces deux à deux, ainsi que tous les sommets. On peut par exemple construire un espace hyperbolique fermé en partant d'un dodécaèdre et en identifiant deux à deux les faces à l'aide de transformations hyperboliques. L'espace intérieur au polyèdre, que je qualifie métaphoriquement de « chiffonné », est à courbure négative en chacun de ses points ; pourtant, tout comme l'hypertore euclidien, son volume est fini, et aucune « droite » ne s'éloigne indéfiniment.

Les concepts de la topologie ont longtemps été négligés en cosmologie relativiste, mais ils se développent rapidement depuis quelques années ; ils ont fait notamment l'objet de la couverture d'un

numéro récent de *Scientific American* (avril 1999), introduisant un article sur la question que j'ai écrit en collaboration avec des collègues américains. Nous avons montré comment, si nous vivions à l'intérieur d'un espace « chiffonné », l'univers apparent serait très différent de l'univers physique : nous percevrions un immense cristal cosmique se déployant dans toutes les directions à partir d'une cellule polyédrique de base ; or seule la cellule de base serait « réelle », c'est-à-dire correspondrait à l'espace physique. En conséquence, les observations de galaxies lointaines nous plongeraient dans une vaste illusion d'optique – un mirage topologique : chaque galaxie originale, appartenant au polyèdre de base, se dupliquerait un grand nombre de fois dans le cristal cosmique, engendrant autant d'images fantômes de la galaxie originale, mais vues dans des directions différentes et à des époques variées de son histoire.

Science et humanisme

Science et humanisme : ce sujet m'est extrêmement cher, car j'ai toujours lutté contre le clivage entre science et culture. Ce clivage, qui remonte au XIX^e siècle est, me semble-t-il, encore plus profond en France que dans les pays anglo-saxons. Nombre de prétendus « intellectuels » ont émis l'idée que la science ne pouvait pas contribuer positivement à la culture. Ils l'ont reléguée aux côtés de la technologie, au rang de simple outil – bénéfique ou maléfique d'ailleurs –, susceptible au mieux d'engendrer un supplément de confort matériel, mais en aucun cas propice à un enrichissement culturel ou spirituel.

Ce point de vue est totalement erroné. Par exemple, il est clair que la science féconde en permanence l'imaginaire des artistes et des créateurs. À ce sujet, je citerai simplement le poète anglais Shelley (*Defence of Poetry*) : « L'une des tâches de l'artiste consiste à absorber les nouvelles connaissances de la science et à les assimiler à des besoins humains, les colorer par des passions humaines, et les transformer en chair et en sang de la nature humaine. » Certains artistes parviennent à effectuer ce transfert, mais c'est aussi à la charge des scientifiques de prendre leur « bâton de pèlerin » et de transformer leur discipline en nourriture culturelle.

Le divorce entre science et culture est partout présent. Nos dirigeants (qu'ils soient politiques ou intellectuels) ne connaissent pratiquement rien à la science. Dans les réunions mondaines, s'il est mal vu d'ignorer la dernière coqueluche dans le domaine du cinéma ou de la pop music, il est de bon ton d'ignorer les développements de la physique des particules, la découverte des quarks ou les preuves de l'expansion de l'Univers. Plus dommageable encore est le clivage qui

existe avec des disciplines comme la sociologie et l'anthropologie. Pour la première fois dans l'histoire peut-être, certains penseurs et philosophes perdent pied dans la compréhension adéquate du monde, parce qu'un fossé les sépare de la vraie connaissance scientifique. Certains d'entre eux tentent de jeter des ponts, mais souvent à l'aide d'analogies trompeuses et d'interprétations abusives sur les termes de la science. Je mentionne brièvement l'exemple du « relativisme culturel », doctrine sociologique selon laquelle, en science comme en anthropologie, il n'y aurait aucune vérité absolue, que tout savoir serait relatif, indéterminé, etc. Le raisonnement, fondé sur une analogie avec la théorie de la relativité générale, est totalement fallacieux. La relativité générale ne nous dit pas que la « vérité » dépend du point de vue de l'observateur ; elle érige au contraire en vérités absolues certaines entités, qui restent indépendantes du référentiel. Ces entités absolues ne sont simplement plus les concepts premiers de l'espace et du temps, mais les principes de symétrie, les constantes de la physique, les invariants spatio-temporels.

Pour ce qui est des rapports entre science et foi, Raymond Chiao déclarait que, selon lui, il y avait aujourd'hui convergence entre la cosmologie et la religion. Pour ma part, je pense qu'il n'y a nulle convergence entre cosmologie et religion, et qu'il n'y a pas non plus de divergence : il s'agit de deux ordres d'entendement totalement différents ! Les analogies tissées par certains entre les modèles de Big Bang, qui décrivent la naissance physique de l'espace-temps, et les récits religieux, qui décrivent la création de l'univers par un principe supérieur, sont artificielles. La plupart du temps, elles reflètent l'incompréhension de la part des scientifiques envers ce qu'est réellement la théologie, et l'incompréhension réciproque des théologiens envers les modèles de Big Bang. Il est bien connu que les philosophes et le clergé ne connaissent très généralement de la science que quelques clichés simplificateurs issus d'une vulgarisation superficielle, et que les scientifiques sont dans leur majorité très naïfs en philosophie et en métaphysique, de sorte que leurs réflexions en ce domaine sont tout aussi superficielles. La tâche très difficile qui nous incombe consiste à tenter d'établir un dialogue interdisciplinaire sérieux, et à inciter les gens à réfléchir à partir des acquis réels de la science moderne.

La confusion entre science et croyance a conduit des dirigeants politiques, comme Mao et Staline, à considérer la théorie du Big Bang comme le reflet de l'idéologie judéo-chrétienne créationniste et à orienter les recherches de leur pays vers d'autres directions apparemment plus matérialistes. À l'inverse, la même incompréhension profonde de la réelle signification des modèles de Big Bang a conduit à des tentatives de récupération théologique, à

l'exemple du pape Pie XII proclamant que la cosmologie moderne confirmait le récit de la Genèse. Plus récemment, certaines déclarations faites par d'éminents cosmologistes américains à propos de la découverte des fluctuations de température dans le rayonnement fossile m'ont laissé pantois : selon eux, on pouvait y voir le visage de Dieu⁵ ! Certes, les images bariolées de fausses couleurs de ces fluctuations sont chargées d'un impact émotionnel très fort, lorsqu'on sait qu'elles nous donnent à voir les embryons de toutes les structures astronomiques – étoiles, galaxies, amas de galaxies – qui se sont ultérieurement développées dans l'Univers, et dont nous sommes tous les lointains descendants. Je me vois obligé de rappeler que Dieu n'est certainement pas codé dans ces fluctuations ! Si Dieu « existe », sa demeure se trouve dans nos cœurs, et certainement pas à 15 milliards d'années-lumière de la Terre. Nul ne l'a mieux perçu que Georges Lemaître : le découvreur des modèles de Big Bang était également prêtre. Or il n'a jamais fait d'amalgame entre cosmologie et religion. Il croyait au Dieu caché d'Isaïe, lequel ne se dévoile pas dans la nature. La question de l'existence de Dieu ne dépend pas d'une solution d'une équation, ou de l'absence de solution d'une équation. La foi ne peut être fondée sur les résultats de la science, ni sur ses limites : « Fonder des croyances religieuses sur une estimation de ce que la science ne sait pas faire est imprudent, voire blasphématoire envers la religion », a déclaré le philosophe des sciences Gérald Holton (*Science en gloire, science en procès*).

Face aux nouvelles conceptions les plus inattendues de la science, le choix matérialiste relatif à ces conceptions est tout aussi légitime que le choix spiritualiste. La distinction radicale entre science et croyance ne clôt pas pour autant la question du sens (comme le voudraient certains matérialistes stricts). Elle ouvre au contraire un vrai débat : la place de la conscience dans l'Univers. Je sens une dualité profonde dans la façon dont le scientifique étudie l'Univers. D'une part, il y a une fascinante *intelligibilité* de l'Univers ; comme le disait Einstein, « le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible ». Il est en effet stupéfiant de constater que l'investigation scientifique moderne permette, par exemple, de reconstituer de façon crédible l'histoire de l'Univers jusqu'à son premier dix milliardièmes de seconde. D'autre part, les mêmes théories physiques qui permettent un tel exploit de la pensée impliquent aussi une *inconnaissabilité* fondamentale sur le monde. Impossibilité de connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule en physique quantique, impossibilité de distinguer certains rapports spatio-temporels en relativité générale, mirages gravitationnels et topologiques nous donnant à voir un univers des apparences très différent de l'univers physique en cosmologie, et ainsi

de suite. Je pense que c'est au sein de cette dualité entre intelligibilité et inconnaissabilité que se place pleinement la quête du sens. Il n'est peut-être pas absurde de penser que l'homme dispose des outils intellectuels (voire spirituels) pour appréhender l'Univers – après tout, l'homme est lui-même le produit de l'évolution cosmique, c'est l'Univers qui a fabriqué la vie et la conscience capable de le penser.

Pour conclure, je citerai l'écrivain Daniel Pons qui, il y a un peu plus de dix ans (à une époque où dominait une certaine idéologie du désespoir de l'homme face à la nature, traduite dans les écrits de Jacques Monod), résumait l'interrogation fondamentale sur la place de l'homme dans l'Univers : « On se penche jusqu'à tomber sur l'astro- et la microphysique, mais qui aidera l'homme à vivre debout, à garder sa station verticale entre ces deux extrêmes ? »

Je crois que la situation a depuis changé. L'astrophysique et la microphysique ne se situent pas aux extrémités, mais au cœur même de la problématique du sens. Grâce à leurs développements et à leurs ouvertures les plus récentes, ce sont justement ces disciplines qui peuvent fournir des supports de réflexion supplémentaires, susceptibles d'aider l'espèce humaine à mieux *vivre debout*.

1- Conférence plénière donnée le 9 avril 1999 au colloque « Un siècle de prix Nobel, Science et humanisme », Unesco, Paris.

2- Depuis, un autre prix Nobel « relativiste » a été attribué en 2006 aux cosmologistes américains George Smoot et John Mather pour leurs observations détaillées du fond diffus cosmologique [*Note ajoutée pour la présente édition*].

3- L'interféromètre gravitationnel franco-italien VIRGO est entré en opération en 2006. Le lancement de l'interféromètre spatial LISA est prévu pour 2013, et sa mise en opération pour 2016, date coïncidant avec le centenaire de l'invention des ondes gravitationnelles par Albert Einstein [*Note ajoutée pour la présente édition*].

4- Il a été démontré depuis que la théorie des cordes à 26 dimensions est instable, et donc impropre à décrire la réalité [*Note ajoutée pour la présente édition*].

5- L'auteur de cette déclaration, George Smoot, prix Nobel de physique 2006, a par la suite assuré qu'il ne fallait y voir aucune connotation théologique [*Note ajoutée pour la présente édition*].

Le temps ? Quel temps¹ ?

Le passage de la conception rigide du temps, supposée par la mécanique classique, à la conception élastique du temps, découverte par la relativité einsteinienne, a marqué un bouleversement majeur de la physique. En analysant le rôle de la lumière et de la gravitation, la théorie de la relativité générale a mis en évidence le couplage du temps et de l'espace au sein d'une même structure géométrique : un espace-temps courbé par la distribution de matière. Les développements très récents dans le domaine de l'unification de la relativité et de la physique quantique suggèrent toutefois que le temps pourrait être incorporé dans l'espace, et par là même, disparaître en tant que tel de la physique.

Introduction

« Le temps est un enfant. »

HÉRACLITE.

La physique cherche, sans se l'avouer vraiment, à éliminer le temps. Car le temps c'est le changeant, le variable, tandis que la physique prétend à l'immuable, à l'invariant : son but est, somme toute, d'extraire des lois éternelles, c'est-à-dire affranchies du temps, à partir de phénomènes passagers. La physique se heurte donc au temps, d'autant plus qu'en son sein même, le temps revêt plusieurs facettes – le temps de la thermodynamique n'est ni celui de la cosmologie, ni celui de la physique quantique.

Plongeons-nous dans certaines d'entre elles. Le terme « plonger » est adéquat car le *fleuve* est une puissante métaphore du temps, qui comprend les notions de source, d'écoulement, de succession, d'irréversibilité, de durée. Les physiciens s'interrogent essentiellement sur trois de ses propriétés :

— son écoulement est-il régulier – c'est-à-dire, le temps est-il rigide ou élastique ?

— son écoulement a-t-il des extrémités – c'est-à-dire, y a-t-il un début du temps, et/ou une fin du temps ?

— son écoulement peut-il changer de direction ?

Le temps uniforme

« Le temps n'existe pas sans un changement qui s'opère par le mouvement. »

Saint AUGUSTIN,
La Cité de Dieu (IV^e siècle).

La naissance du temps scientifique coïncide avec la grande révolution mécaniste de la science occidentale, au début du XVII^e siècle. Galilée, puis Kepler, Huygens et Newton réalisent un « programme » déjà posé par Aristote : le temps est la mesure du mouvement. Si près de deux mille ans ont été nécessaires à la réalisation du projet aristotélicien, c'est parce que la technologie des garde-temps a évolué lentement. Le cadran solaire est peu à peu remplacé par la clepsydre et le sablier, les premières horloges mécaniques apparaissent en Occident à la fin du XIII^e siècle, les minutes et les secondes ne sont définies qu'au XIV^e siècle. Le temps se découpe dès lors en unités de plus en plus petites. En le « matérialisant » par la succession des engrenages de roues ou les oscillations de pendules, on le *mathématise* au moyen d'une suite numérique. Le temps acquiert ainsi le statut de grandeur mesurable.

La première mathématisation du temps consiste à dire que le temps n'a qu'une dimension. En effet, un seul nombre suffit à déterminer une date. Le temps possède donc automatiquement une structure ordonnée : sur une droite, un point se situe nécessairement avant ou après un autre point. La *topologie* du temps est donc très pauvre, contrairement à celle de l'espace ; elle n'offre que deux variantes : la ligne ou le cercle – c'est-à-dire le temps linéaire ou le temps cyclique. Ce dernier, qui a longtemps prévalu dans les mythes (tel celui de l'Éternel retour), est aujourd'hui abandonné par la physique car il viole le postulat de causalité.

De la mathématique du temps, revenons à sa mesure. À partir du XVII^e siècle, il devient manifeste que les divers types d'horloges donnent des mesures concordantes de l'écoulement du temps. En principe, donc, toutes les horloges de l'Univers pourraient être synchronisées et, à partir de là, battre éternellement au même rythme ! La mécanique galiléo-newtonienne en conclut que *le temps s'écoule uniformément*, qu'il est *universel*, absolu et invariable, c'est-à-dire indépendant du référentiel.

Cette notion de *référentiel* est essentielle dans toute la physique. Un référentiel est un système de coordonnées. Le physicien doit

préciser comment les lois de la physique changent lorsqu'un observateur dans un référentiel donné est en mouvement par rapport à un autre. Les formules qui répondent à cette question sont des transformations de coordonnées entre référentiels. L'idée de la « relativité du point de vue » est déjà présente chez Galilée (elle sera formulée de façon correcte par Descartes, puis Newton) dans la question suivante : existe-t-il des référentiels privilégiés, dits *inertiels*, dans lesquels les lois du mouvement ne changent pas ? La mécanique classique répond par l'affirmative : les lois de la physique s'expriment de façon identique dans les référentiels en mouvement relatif uniforme, c'est-à-dire animés l'un par rapport à l'autre d'une vitesse constante. Ces référentiels définissent le « repos ».

Dans la mécanique classique, la loi d'inertie implique notamment qu'il y a addition algébrique des vitesses : si vous courez à 20 km/h et tirez vers l'avant un coup de feu dont la balle file à 600 km/h par rapport à vous, elle frappera une cible fixe à la vitesse de 620 km/h – somme des deux composantes. Si vous vous retournez en courant et tirez en arrière sur une autre cible fixe faisant face à la première, la balle l'atteindra cette fois à la vitesse de 580 km/h. Cela semble évident.

Cette loi d'inertie est liée au caractère absolu du temps (c'est-à-dire le fait que sa mesure ne change pas d'un référentiel à l'autre), mais elle montre aussi que l'espace est, d'une certaine manière, assujéti au temps par l'intermédiaire de la vitesse. Toutefois, la séparation spatiale (par exemple la longueur d'un objet) reste bien invariante dans les changements de repère inertiels, au même titre que l'intervalle temporel entre deux événements. On peut donc dire que la physique galiléo-newtonienne pose un *espace absolu* et un *temps absolu*, constituant un cadre fixe et immuable donné d'avance, indépendant des phénomènes qui s'y déroulent – c'est-à-dire des mouvements de la matière.

Le temps élastique

« Le temps n'a pas la même allure pour tout le monde. »

William SHAKESPEARE,
Comme il vous plaira (1599).

Outre l'élaboration de la mécanique, le XVII^e siècle a vu également la naissance de théories sur la lumière, à commencer par le fait que celle-ci se propage à la vitesse de 300 000 km/s « dans le vide ». Qu'est-ce que le vide ? Dans le schéma newtonien, il s'agissait de l'espace absolu imprégné d'une sorte de fluide omniprésent, l'éther,

support et milieu de propagation des ondes lumineuses.

Entre 1881 et 1894, Albert Michelson et Edward Morley ont tenté de mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Selon les lois de la mécanique classique, le mouvement de la Terre par rapport au référentiel absolu « éther » devait se manifester par une différence des vitesses apparentes de la lumière selon qu'elle était mesurée dans le sens du mouvement terrestre ou dans une direction perpendiculaire. Or aucune différence ne put être mise en évidence. Qu'en conclure ? Soit que la Terre est fixe par rapport à l'éther, c'est-à-dire absolument immobile dans l'Univers, ce qui n'est guère crédible au vu de l'astronomie copernicienne, soit que l'espace absolu n'existe pas.

En fait, le résultat négatif des expériences de Michelson et Morley était contenu en germe dans la toute récente théorie électromagnétique de Maxwell (1873). Celle-ci est en conflit évident avec la relativité galiléo-newtonienne, dans la mesure où la vitesse de la lumière y apparaît comme un invariant absolu, indépendant de tout observateur. En effet, dans un changement de référentiel obéissant aux formules galiléo-newtoniennes, les vitesses devraient s'ajouter. Cependant, en vertu des lois de l'électromagnétisme et des expériences de Michelson et Morley, si le coureur, au lieu de tirer des balles, projette vers l'avant des rayons lumineux à la vitesse de 1 079 280 000 km/h (c'est-à-dire 300 000 km/s), ceux-ci n'atteignent pas la cible fixe à 1 079 280 020 km/h, mais toujours à 1 079 280 000 km/h ! *La vitesse de la lumière reste toujours la même*, que l'observateur ou la source lumineuse soient en mouvement ou pas. La conception galiléo-newtonienne de l'espace et du temps est donc incompatible avec la théorie électromagnétique de l'espace et du temps. Il faut rejeter l'une ou l'autre.

Au début du XX^e siècle, nombre de chercheurs ont réfléchi sur la façon de résoudre la contradiction. En 1904, Lorentz a proposé de nouvelles formules de transformation rendant compte de l'invariance de la vitesse de la lumière. Poincaré a introduit en 1905 un formalisme mathématique que Hermann Minkowski a mis au point en 1908, en incorporant le temps à l'espace. Mais c'est Einstein qui, en 1905, a pleinement mesuré l'ampleur du bouleversement et, avec la théorie de la relativité restreinte, a imposé un nouvel *espace-temps* tissé par la lumière.

Le passage de témoin entre la relativité galiléo-newtonienne et la relativité restreinte consiste à remplacer les deux invariants absolus « intervalle d'espace » et « intervalle de temps » par deux autres : la vitesse de la lumière dans le vide, c , et l'intervalle d'espace-temps, c'est-à-dire la distance spatio-temporelle entre deux événements.

En conséquence, dès qu'un observateur est en mouvement par

rapport à un référentiel donné K, il mesure un intervalle de temps plus long et un intervalle d'espace plus court qu'un observateur immobile par rapport à K. Ainsi, il y a un « prix à payer » : les vitesses ne s'additionnent plus, les mesures d'espace et de temps dépendent du mouvement de l'observateur. En termes simples, l'espace et le temps sont devenus *élastiques*. Il s'agit bien là du temps « objectif », celui mesuré par les horloges, et non du temps subjectif de l'observateur : par rapport à un référentiel donné, une horloge en mouvement bat plus lentement qu'une horloge au repos, et plus sa vitesse tend vers celle de la lumière, plus elle semble ralentir. À la limite, pour un photon, c'est-à-dire un grain de lumière, le temps ne s'écoule plus ; le photon ne vieillit jamais, son temps « propre » est en quelque sorte figé.

Certes, ces différences ne sont notoires qu'aux vitesses très élevées, de sorte qu'elles ne se remarquent pas dans la vie de tous les jours. Il n'empêche que l'application de ces nouvelles « règles du temps » conduit à des situations surprenantes. En 1911, le physicien français Paul Langevin a imaginé un exemple frappant de l'élasticité du temps, qui a connu une fortune médiatique considérable sous le nom de « paradoxe des jumeaux ». Deux jumeaux sont âgés de 20 ans. L'un d'entre eux part explorer le cosmos à bord d'une fusée. Il effectue un aller-retour à la vitesse de 297 000 km/s (99 % de la vitesse de la lumière), vers une planète lointaine située à 26 années-lumière. À son retour sur Terre, la montre du voyageur a marqué six années de temps propre, celle de son frère resté sur Terre quarante années. Il s'agit bien ici de temps vécu : les horloges biologiques se réduisant en dernier ressort à des horloges atomiques, elles sont affectées de la même façon par le mouvement. On peut tout aussi bien mesurer l'âge des frères en nombre de battements cardiaques ; le voyageur a réellement 26 ans à son retour, son jumeau sédentaire en a 60.

Bien que paradoxale sur le plan psychologique, l'expérience fictive des jumeaux n'est nullement une contradiction de la relativité einsteinienne, elle illustre au contraire l'inéluctable élasticité du temps.

Cette expérience de pensée de Langevin a été vérifiée avec des particules élémentaires appelées « muons ». Le muon est une particule instable qui se désintègre au bout de 1,5 microseconde ; il s'agit là de son temps de vie propre. De puissants accélérateurs de particules sont capables de conférer au muon une vitesse de 0,9994 c, donc très proche de celle de la lumière. Le temps de vie du muon en mouvement (mesuré dans le référentiel au repos du laboratoire) devient alors 44 microsecondes, soit trente fois plus que son temps de vie au repos. L'accord avec la relativité restreinte est parfait.

Cependant, Einstein a vite été troublé par le fait que, bien que les

représentations relativistes de l'espace et du temps différaient de celles de la théorie newtonienne, la relativité restreinte postulait elle aussi l'existence d'une classe privilégiée de référentiels inertiels, ceux en translation uniforme. Elle stipulait donc encore un cadre absolu, fixé, indépendant des mouvements de la matière, appelé espace-temps de Minkowski. Or la matière est partout présente dans l'Univers, et engendre la gravitation. Il fallait donc élargir le schéma relativiste de façon à incorporer la gravitation. Ce fut l'œuvre de la relativité générale (1916).

Le temps et la gravitation

« Que serait la physique sans la gravitation ? »

Albert EINSTEIN.

La relativité générale est une synthèse entre la gravitation newtonienne et la relativité restreinte. La gravitation a pour effet d'accélérer la matière, alors que les référentiels inertiels de la relativité restreinte sont justement ceux qui ne sont pas accélérés. Or la gravitation est omniprésente dans la nature. La relativité restreinte n'est donc pas une bonne théorie de l'Univers.

Conscient de cette faille, Einstein a dès lors été conduit à reconsidérer le concept même de gravitation. Selon lui, la gravitation n'est pas réellement une force s'exerçant entre les différents contenus matériels de l'Univers, elle est une propriété géométrique du contenant lui-même. Cette insertion de la gravitation impose à l'espace-temps entier d'être déformé, d'acquérir une géométrie non euclidienne *courbe*. Les corps matériels ne sont pas astreints à bouger dans un espace-temps plat sous l'action de forces de gravitation, ils épousent librement les contours d'un espace-temps courbe. En d'autres termes plus figurés, l'espace-temps est « mou », cabossé par la matière qu'il contient, et la matière s'y déplace au gré de la courbure. La trame de l'espace-temps reste tissée par la lumière. Celle-ci, influencée par la gravitation, emprunte les chemins les plus courts, qui ne sont plus des lignes droites mais des géodésiques courbes.

Avec la relativité générale, le temps acquiert une élasticité supplémentaire. Puisque les accélérations ralentissent les horloges (paradoxe des jumeaux), la gravitation ralentit aussi les horloges. Par exemple, une horloge au rez-de-chaussée bat plus lentement qu'une horloge au premier étage. Mais la différence est si infime que ce n'est qu'après la mort d'Einstein que l'on a su fabriquer des horloges suffisamment précises pour mesurer l'élasticité du temps dans un

champ de gravité aussi faible que celui de la Terre. En 1971, l'US Naval Observatory a fait embarquer des horloges au césium fantastiquement précises à bord de deux avions commerciaux, l'un volant vers l'ouest, l'autre vers l'est. Au retour, les horloges volantes ont été comparées à des horloges strictement identiques restées au sol. Dans cette expérience, deux effets entraient en jeu : un effet de relativité restreinte dû à la vitesse des avions (environ 1 000 km/h), et un effet de relativité générale dû à la plus faible pesanteur en altitude. L'horloge qui avait voyagé vers l'ouest avançait ainsi de 273 milliardièmes de seconde, celle qui avait voyagé vers l'est retardait de 59 milliardièmes de seconde – en parfait accord avec les calculs relativistes.

Pour que l'élasticité du temps devienne manifeste, il faut se trouver dans des champs gravitationnels très intenses, par exemple près de *trous noirs*. Rappelons qu'un trou noir est le résultat de l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive au-delà d'un stade tel que les rayons lumineux eux-mêmes restent emprisonnés dans le champ de gravité. Si des rayons lumineux sortent à intervalles de temps strictement égaux de la surface d'une étoile en effondrement, les intervalles reçus et mesurés par n'importe quelle horloge extérieure sont inégaux et s'allongent. À la limite, le rayon lumineux émis juste au moment où le trou noir se forme met un temps infini pour parvenir à l'extérieur. Autrement dit, le temps propre de formation du trou noir (quelques fractions de seconde) est distinct du temps apparent, mesuré par une horloge lointaine ne participant pas au mouvement (temps dans lequel le trou noir ne se forme donc jamais). Ce phénomène de « gel temporel » est une illustration extrême de l'élasticité du temps en relativité générale.

Causalité et relativité

La succession irréversible des phénomènes et des événements, imposée par l'observation et la raison (« la cause précède toujours l'effet »), s'appelle la *causalité*. C'est une règle imposée par la logique, non par la théorie de la relativité. Il est vrai que, dans la relativité restreinte et son univers plat, sans gravitation, la causalité est implicite. Car voyager dans son passé équivaut strictement à se déplacer plus vite que la lumière, ce qui est fondamentalement interdit. En revanche, dans la relativité générale et ses univers courbés par la gravitation, certaines distorsions subtiles imprimées à l'espace-temps – par un trou noir en rotation notamment – autorisent en principe l'exploration du passé sans jamais dépasser la vitesse de la lumière ! Dans un espace-temps arbitraire, la causalité est violée s'il existe une *boucle temporelle*, c'est-à-dire une ligne d'univers refermée

sur elle-même. Une particule empruntant un tel trajet pourrait remonter dans son propre passé et par là même modifier son futur et engendrer des paradoxes. (Une telle situation est toutefois courante en mécanique quantique, sans violer la causalité au niveau macroscopique.)

En 1976, une très sérieuse Bacon Foundation a offert un prix de 300 livres sterling à quiconque résoudrait le problème formulé de la façon suivante : « Selon la théorie en vigueur, les trous noirs en rotation sont de véritables portes ouvertes sur d'autres régions de l'espace-temps. Comment donc un vaisseau spatial pourrait-il passer d'un trou noir en rotation à une autre région de l'espace-temps sans être détruit par le champ gravitationnel d'une singularité ? » Le problème n'a pas été résolu avant 1985, et encore de façon exotique : seuls des trous noirs formés de matière exerçant une gigantesque « pression négative » pourraient engendrer des boucles temporelles. Une pression négative équivaut à une tension, comme celle d'un ressort que l'on étire. Dans la matière ordinaire, la tension est toujours beaucoup plus faible que l'énergie, mais dans la matière exotique nécessaire pour stabiliser un « portail temporel », les proportions seraient inversées. Tout cela est évidemment hautement spéculatif ; personne n'a la moindre idée si ce type de matière « négative » peut exister dans la nature. Pour utiliser de tels raccourcis de l'espace-temps, il faudrait être capable de construire de vastes trous noirs négatifs, peut-être en faisant grossir un trou noir négatif microscopique. Et même en admettant cette fantastique idée, il y a peu de chances qu'un vaisseau spatial constitué de matière normale puisse traverser sans danger une région d'énergie négative !

Les flèches du temps

La gravitation engendre, dans certaines situations extrêmes, une flèche temporelle : les systèmes gravitationnels ont en effet la possibilité de se contracter sans limite pour former irréversiblement des trous noirs et des singularités. C'est ce que l'on appelle la *flèche gravitationnelle*.

Divers domaines de la physique engendrent leurs propres flèches² :

1. La flèche radiative

Dans les phénomènes radiatifs, on ne trouve que les solutions dites « retardées », c'est-à-dire qu'une onde n'apparaît qu'après sa source et conduit inéluctablement à l'extinction progressive de celle-ci.

2. La flèche thermodynamique

La seconde loi de la thermodynamique (augmentation irréversible

de l'entropie pour tout système fermé) définit la plus ancienne flèche reconnue par la physique et se manifeste tous les jours à nos yeux. L'auto-organisation des systèmes naturels observée dans l'évolution biologique et sociale paraît contradictoire avec la deuxième loi, mais elle est probablement en accord avec elle si l'entropie de l'environnement est prise en compte.

3. La flèche microscopique

Certains processus relevant de la physique des particules élémentaires (par exemple la désintégration du méson K_0) sont temporellement orientés.

4. La flèche quantique

En mécanique quantique, le processus même de mesure, appelé « réduction du paquet d'onde », engendre l'apparition irréversible de propriétés « classiques » (position, vitesse des particules, etc.).

6. La flèche cosmologique

L'expansion de l'univers présentement observée définit une direction temporelle, peut-être reliée à la flèche gravitationnelle puisque l'univers est gouverné à grande échelle par la gravitation. Certains physiciens estiment qu'il s'agit peut-être là de la « flèche mère » dont dériveraient toutes les autres, mais le sujet est d'autant plus controversé que les domaines de la physique ci-dessus mentionnés (essentiellement la mécanique quantique et la relativité générale) ne sont pas unifiés en une théorie cohérente.

La disparition du temps ?

« Tu vois, mon fils : ici, le temps devient espace. »

Richard WAGNER,
Parsifal (1882).

Déjà le philosophe mathématicien Leibniz, contemporain de Newton, s'était élevé contre les idées d'espace et de temps en tant qu'entités absolues. Par des arguments d'ordre plutôt philosophique, il soutenait que l'espace et le temps n'existaient qu'en relation avec la matière. Un siècle après, le philosophe Ernst Mach a repris ces idées, et c'est en partie sous son influence qu'Einstein a bâti l'édifice de la relativité générale, où espace, temps, matière et lumière sont inextricablement liés. Pourtant, il a partiellement échoué : en l'absence de matière, l'espace-temps ne se réduit pas à « rien », mais à une structure géométrique décrite par l'espace-temps de Minkowski.

Peut-être la bonne solution consiste-t-elle à supprimer purement et simplement le temps de la physique. L'élimination du temps relève d'un programme général : unifier la relativité et la physique quantique

dans un même schéma. La question du temps se pose de la façon suivante ; l'espace-temps relativiste non quantique est défini par sa structure causale, c'est-à-dire le fait que deux événements sont causalement liés si une interaction se propageant à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière les relie. Autrement dit, l'Univers n'est pas autre chose qu'une certaine relation d'ordre temporel entre tous ses événements. L'espace-temps quantique, lui, fluctue un peu à la façon de la surface tumultueuse d'un océan. Il n'a donc plus de structure causale bien définie, et la relation d'ordre temporel devient indéterminée.

Pour sortir de l'impasse, les physiciens ne savent pas s'il faut modifier les concepts de la relativité générale pour les plier à ceux de la physique quantique, s'il faut modifier la théorie quantique pour la « géométriser » ou s'il faut trouver autre chose de radicalement différent. L'une des tentatives les plus intéressantes de ces dernières années est l'approche dite de la *décohérence*. Les entités mathématiques fondamentales ne sont plus ni des points ni des événements, mais des « univers possibles » ; à chaque paire d'univers possibles U_1, U_2 est associé un nombre mesurant la probabilité pour qu'une histoire faisant passer de U_1 à U_2 ait lieu. Cette méthode (décrite ici en termes extraordinairement simplifiés) évite de poser une notion préalable de temps, puisqu'un univers peut être quelque chose de beaucoup plus général qu'une simple relation d'ordre temporel entre événements.

Toutes les approches de la gravitation quantique sont néanmoins grevées par l'absence de données expérimentales ou observationnelles. Il est même difficile de concevoir des expériences terrestres qui puissent recréer des énergies suffisamment élevées pour tester ces théories. La véritable nature physique du temps n'est donc pas près d'être élucidée.

Terminons sur une note d'humour. Charlie Chaplin dit un jour à Einstein (en substance, car je cite de mémoire) : « Moi, je suis célèbre parce que tout le monde me comprend. Vous, vous êtes célèbre parce que personne ne vous comprend ! » C'était une jolie boutade, mais on peut s'interroger sur le succès rencontré auprès d'un large public par une théorie aussi difficile que la relativité générale (tant du vivant d'Einstein que de nos jours, avec les trous noirs et le Big Bang). Maintes explications peuvent être avancées. Ajoutons-en une ici. Le temps subjectif éprouvé par chacun d'entre nous – celui que l'on pourrait dénommer *tempus* – est de toute évidence non uniforme et relatif. Le temps des physiciens – celui que l'on pourrait dénommer *chronos* –, d'abord considéré comme absolu et uniforme dans la mécanique classique, est également devenu élastique et relatif avec la relativité. Le succès « populaire et philosophique » de la relativité

vient donc peut-être, en partie, du fait qu'en introduisant un peu de *tempus* dans *chronos*, elle a rendu la physique plus humaine.

1- Conférence donnée à Montpellier le 8 mai 1998 lors du colloque « Soin et psychose : question de temps ».

2- La flèche du temps biologique et la flèche du temps psychologique relèvent des sciences humaines. Je ne mentionne ici que les flèches du temps dans les domaines des sciences dites « dures » (qui n'en sont pas pour autant inhumaines).

Voyages dans le temps¹

Le voyage dans le temps constitue un sujet éminemment spéculatif, aux extrêmes limites de l'imaginaire. Ma qualité de physicien théoricien me conduit toutefois à allier les ressources scientifiques les plus sérieuses à la plus grande créativité pour élaborer de nouveaux modèles du cosmos, s'agissant de comprendre la véritable nature de l'espace, du temps, de la matière ou de la gravité. Si notre créativité puise dans un imaginaire à la fois culturel, philosophique et littéraire, elle reste toutefois sous le contrôle des lois de la physique. La physique utilisée peut aussi bien être relativiste, quantique ou beaucoup plus spéculative – ce qui peut conduire à l'élaboration de concepts défiant le bon sens.

Mon intérêt se portera sur le voyage dans le temps – qu'il s'agisse de voyager dans le futur, à une vitesse supérieure à celle qui nous entraîne déjà inéluctablement vers notre fin, ou bien dans le passé. Je me placerais pour commencer sous la référence incontournable du film de Stanley Kubrick. Lorsqu'à la fin de *2001 : L'Odyssée de l'espace*, tout comme dans le scénario imaginé par Arthur C. Clarke en 1968, l'astronaute retrouve le mystérieux monolithe noir dans les parages de Saturne, il se trouve entraîné dans une sorte de vortex, qui se révèle être une faille temporelle le faisant d'abord vieillir extrêmement vite, puis le transformant en fœtus. Les spectateurs de l'époque ont été quelque peu surpris par ces images, car la découverte des trous noirs et des hypothétiques trous de ver (dont le nom a précisément été forgé en 1968 par le physicien américain John Wheeler) était très récente. Arthur C. Clarke avait lu les premiers articles de vulgarisation sur le sujet et souhaitait, dans son scénario, illustrer ces étranges distorsions de l'espace et du temps qui seraient théoriquement permises par les trous noirs.

Définition du temps

Pour pouvoir discuter avec pertinence des voyages dans le temps, il faut d'abord disposer d'une définition commune du temps. Saint Augustin disait en substance : « Si personne ne me demande ce qu'est le temps, je sais parfaitement de quoi il s'agit, mais dès qu'on me pose

la question, je ne sais plus quoi répondre. » Je me contenterai donc d'une définition très simple, telle qu'elle nous est donnée par la physique : le temps est un espace mathématique orienté à une dimension. L'existence d'une seule dimension nous permet de représenter aisément, sur une ligne, le passé, le présent et le futur. Le degré de liberté qu'autorise cette représentation mathématique est ainsi bien plus restreint que celui que nous offrent les représentations de l'espace. Les trois dimensions de l'espace – au minimum, certaines théories récentes lui en attribuant plusieurs autres – permettent de jouer avec sa topologie beaucoup plus facilement qu'avec celle du temps. En raison de son caractère unidimensionnel, il n'existe en effet que deux topologies possibles du temps : le temps ouvert et infini, qui est linéaire, et le temps fermé et cyclique, représenté par une boucle. Tandis que, selon la mécanique classique, le temps linéaire ne permet pas de retour en arrière, et donc pas de voyage dans le passé, il en va tout autrement du temps cyclique, dont certaines solutions théoriques de la relativité générale nous donnent des exemples.

Voir ou voyager ?

Ma deuxième référence culturelle vient de la « machine à explorer le temps » imaginée en 1895 par H. G. Wells, à une époque antérieure à l'avènement de la théorie de la relativité. Il existe en fait deux façons d'explorer le temps. Nous pouvons nous contenter de « voir » les événements du passé ou du futur sans nous y rendre, ou bien nous pouvons imaginer y voyager véritablement.

Selon la physique newtonienne, dite classique, il n'est pas possible de voir dans le futur. Il est en revanche tout à fait facile, et même inéluctable, de voir dans le passé grâce à l'observation du ciel profond, en raison de la vitesse finie de la lumière. Les grands télescopes nous permettent ainsi de voir dans le même champ spatial des galaxies appartenant à des tranches temporelles plus ou moins éloignées dans le passé, allant de quelques millions à quelques milliards d'années.

Le voyage physique dans le futur n'est pas non plus permis dans le cadre de la mécanique newtonienne, ni dans celui de la mécanique quantique. Il l'est cependant en mécanique relativiste, selon laquelle le temps a une certaine élasticité qui nous permettrait, en voyageant à des vitesses très proches de celle de la lumière, de vivre à des rythmes temporels différents de ceux qui ne voyagent pas. Cette propriété, illustrée notamment par le fameux « paradoxe des jumeaux », n'a rien de paradoxal, puisqu'elle n'est qu'une conséquence naturelle de la théorie relativiste.

Le voyage dans le passé est également interdit en mécanique

classique. En revanche, il ne l'est pas nécessairement en physique relativiste. Certaines solutions mathématiques liées aux équations de la relativité générale décrivent en effet des boucles temporelles fermées qui permettraient de remonter le temps. La pertinence physique de ces solutions théoriques se pose toutefois, compte tenu des problèmes de causalité qu'elles engendrent (la logique exigeant que tout effet soit précédé de sa cause). Par ailleurs, le paradoxe de Fermi énonce que si des civilisations du futur étaient suffisamment avancées pour être capables de voyager dans le passé, alors elles auraient déjà dû nous rendre visite...

Précisons maintenant quelques-unes des idées énoncées ci-dessus.

Temps élastique

Entre Newton et Einstein, les conceptions sur la nature du temps et de l'espace ont radicalement changé. La physique reposant sur la mécanique classique de Newton utilise deux invariants, les intervalles d'espace et les intervalles de temps, qui sont absolus et rigides, c'est-à-dire qui ne permettent pas de voyager ni dans le futur ni dans le passé. Dans la physique relativiste d'Einstein, ces deux invariants sont remplacés par deux autres : la vitesse de la lumière dans le vide et l'intervalle d'espace-temps (qui représente une certaine combinaison algébrique des intervalles d'espace et de temps). Dans ce cadre, les longueurs et les durées ne sont plus des invariants ; elles ne constituent plus que des quantités relatives à la vitesse des observateurs qui les mesurent – d'où le nom de théorie de la relativité.

Celle-ci offre de nouvelles libertés en même temps que de nouvelles contraintes. Elle définit l'Univers non plus en termes d'espace et de temps séparés, mais comme une entité géométrique à quatre dimensions, qui couple l'espace et le temps : l'espace-temps. Pour représenter les phénomènes en relativité, il faut avoir recours à des diagrammes d'espace-temps. L'observation d'un phénomène, qui se déplace sur ce diagramme de façon aléatoire à une vitesse inférieure ou égale à 60 km/h, pendant cinq minutes, conduit à la formation d'une ligne d'univers représentant un cône de circulation. Toutes les possibilités de déplacement de ce phénomène se trouvent nécessairement à l'intérieur de ce cône de circulation. En relativité, ces phénomènes sont des particules élémentaires, des photons, des rayons lumineux et ne peuvent se déplacer à plus de 300 000 km/s dans le vide. À travers ce cône de lumière ainsi défini, il apparaît clairement qu'à partir d'un point de l'espace-temps, toutes les trajectoires physiques possibles sont nécessairement confinées à l'intérieur du cône de lumière.

Dans la théorie de la relativité restreinte, dite théorie de l'espace-

temps plat de Minkowski, chaque événement, défini par trois coordonnées d'espace et une coordonnée de temps, engendre un cône vers le passé et un cône vers le futur, qui interdit de voyager en dehors de certaines limites. Ce qu'on pourrait appeler l'« ailleurs » est physiquement interdit, parce que les lignes de l'Univers ne peuvent former des boucles. Un retour en arrière dans le passé n'est donc pas envisageable, car il impliquerait de sortir des cônes de lumière, ce qui suppose de voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière. La théorie de la relativité l'interdit, puisque le seul fait de tendre vers la vitesse de la lumière signifie que l'énergie tend vers l'infini – ce qui est impossible par définition.

Malgré les contraintes qui pèsent sur tout voyage dans le passé, cette théorie permet – sur le papier – de voyager vers le futur. L'espace et le temps n'étant plus absolus, mais relatifs, ils acquièrent une certaine forme d'élasticité. Ce phénomène est illustré par le paradoxe des jumeaux de Langevin, qui a été proposé en 1911. Cette expérience de pensée suppose qu'un astronaute décide de se rendre sur Véga, située à 26 années-lumière de la Terre, en suivant la trajectoire du rayon lumineux, sur laquelle le temps ne s'écoule pas, à une vitesse proche de celle de la lumière. Tandis que le temps biologique de l'astronaute s'écoulera pendant six ans, entre l'aller et le retour, celui de la Terre aura été, à son retour, de quarante ans – ce sera l'âge dont son jumeau aura vieilli en son absence. Il s'agit là d'une conséquence incontournable de l'élasticité du temps en relativité, qui permet d'intéressants voyages dans le futur – mais enlève tout intérêt au retour. Des expériences ont été menées pour en prouver la réalité. Ainsi, des horloges atomiques ont été placées dans des avions, qui ont fait plusieurs fois le tour de la planète, afin d'être comparées à des horloges restées à terre. Un écart temporel de quelques micro-secondes a effectivement été constaté.

La théorie de la relativité générale incorpore, quant à elle, la gravité dans la structure de l'espace-temps. Il apparaît que l'espace-temps, qui est déjà élastique du fait de la vitesse d'observation, l'est également sous l'effet de la masse de matière que représente la gravité. Dans ce cadre, les cônes de lumière épousent les courbes de l'espace-temps, si bien qu'il est envisageable que ces formes incurvées, poussées au maximum, se transforment en boucles spatio-temporelles. Le phénomène des trous noirs naît justement d'étoiles, qui apparaissent suffisamment massives pour creuser un puits très profond, qui va distordre fondamentalement l'espace et le temps, à l'intérieur et à l'extérieur de lui-même. Cette théorie, encore balbutiante en 1968, a connu des développements nombreux en astrophysique, dont certains se sont révélés hautement spéculatifs.

La principale question, qui obsède encore les chercheurs, tient à

ce qui se trouve au fond des trous noirs. Certains pensent qu'ils sont peut-être bouchés par un nœud, c'est-à-dire par une singularité de l'espace et du temps, où la matière s'entasse indéfiniment. Une autre possibilité a été dégagée par une solution des équations de la relativité, décrivant la structure de l'espace et du temps autour d'un trou noir en rotation, et est connue sous le nom de trou de ver (*wormhole*). Selon cette théorie, l'espace-temps aurait une structure beaucoup plus subtile que ce qui était supposé au départ, ce qui permettrait à un trou noir d'être connecté à une autre région de l'Univers, qui fonctionnerait à l'inverse – c'est pourquoi, elle est appelée trou blanc ou fontaine blanche. Ainsi, le voyage vers Véga, à 26 années-lumière de la Terre, mettrait vingt-six ans, si les astronautes pouvaient voyager à une vitesse proche de celle de la lumière, mais seulement une fraction de seconde, s'ils pouvaient emprunter un trou de ver, qui réduirait la distance à un kilomètre. Les trous de ver constitueraient ainsi d'incroyables raccourcis spatio-temporels dans l'Univers.

Parmi toutes les équations mathématiques développées par la théorie de la relativité générale, seul un très petit nombre a une réelle pertinence physique. Il apparaît ainsi qu'en admettant qu'un trou de ver puisse se former entre deux trous noirs de la forme la plus simple (c'est-à-dire qui ne sont pas en rotation), l'instabilité au sein de ce phénomène dynamique serait de toute façon telle qu'un vaisseau n'aurait jamais le temps de le traverser avant qu'il ne se bouche. Dans l'Univers, les trous noirs sont, de surcroît, le plus souvent en rotation et sont chargés d'électricité. La navigation dans cet espace-temps, sans sortir des cônes de lumière définis par le diagramme de Penrose, se traduirait par plusieurs trajectoires possibles, dont certaines resteraient à l'intérieur du trou noir, tandis que d'autres en sortiraient sans être détruites par la singularité et déboucheraient sur d'autres univers spatio-temporels. Cette construction est cependant purement théorique, puisqu'elle repose sur l'hypothèse d'un trou noir qui serait totalement isolé du reste de l'Univers. Elle ne tient pas compte du fait que la matière qui entoure le trou noir peut permettre à une particule infime (un simple proton ou un photon) de s'y introduire, ce qui provoquera la destruction inéluctable du trou de ver. Les trous noirs macroscopiques, formés, par exemple, par l'effondrement gravitationnel des étoiles, sont par conséquent fondamentalement instables, si bien que la nature ne les produit pas.

Les chercheurs ont, malgré tout, continué à spéculer, en essayant de trouver le moyen de stabiliser les trous noirs. Pour compenser les effets produits par une particule ordinaire, ils ont imaginé de tapisser les trous noirs d'une forme d'énergie « extraordinaire », dite exotique, dont l'existence est prévue par la mécanique quantique. Il s'agit, en

particulier, de l'énergie du vide, qui exercerait une pression négative, empêchant le trou de ver de se fermer. D'autres études ont cependant montré qu'à l'échelle macroscopique, cette théorie ne fonctionnait pas. Le seul espoir viendrait de la structure microscopique de l'espace et du temps, qui ressemblerait à de l'écume, formée par les fluctuations spontanées de l'énergie bouillonnante du vide. L'observation à l'aide d'un microscope extrêmement puissant nous offrirait une certaine possibilité de voir apparaître la forme d'un micro-trou de ver. Certains ont ainsi imaginé que des civilisations évoluées qui maîtriseraient l'écume de l'espace-temps à l'échelle microscopique pourraient utiliser ces trous de ver microscopiques, qui sont stables durant quelques fractions de seconde, pour en tapisser les trous de ver de l'Univers, afin de les stabiliser et, éventuellement, de voyager dans le temps.

Problèmes insolubles

Si cela s'avérait réalisable, nous serions confrontés aux deux problèmes précédemment cités. La violation de la causalité, d'une part, a été parfaitement illustrée par René Barjavel, dans *Le Voyageur imprudent*, qui en a démontré l'absurdité, en faisant tuer par son héros ses propres ancêtres, l'empêchant ainsi d'être né et, donc, d'avoir pu remonter le temps pour tuer ses ancêtres... La théorie de la relativité générale prévoyant effectivement ce type de distorsion temporelle, les physiciens ont inventé, pour s'en protéger, la conjecture dite de « protection chronologique ». Le fait, d'autre part, que nous n'ayons pas encore été visités par des voyageurs venus du futur, a été expliqué par certains auteurs de science-fiction par l'existence de patrouilles du temps, qui vérifieraient que personne ne vienne du futur pour modifier le passé.

En conclusion, les voyages dans le temps constituent de beaux rêves, qui sont peut-être permis par la théorie de la gravité quantique, mais qui, en dehors des laboratoires, ne survivent pas longtemps à la réalité. De fait, nous sommes tous prisonniers de l'espace et du temps. Les créateurs, les artistes et les poètes ont malgré tout rêvé de s'affranchir de ces contraintes. Ainsi de William Blake, qui a espéré « tenir l'infini dans la paume de la main et l'éternité en une seconde ». Marinetti a, quant à lui, écrit ce poème étonnant en 1912, « Les licous du temps et de l'espace », à l'époque où seule la théorie de la relativité restreinte avait été fondée :

« Temps ! Espace !
Seules divinités qui maîtrisez le monde !...
Je me révolte contre vous !
[...]
Temps ! Espace ! Que diriez-vous
si brusquement je traversais,

en dix secondes,
l'intervalle qui me sépare
de ce rond horizon,
car d'après vos calculs,
il ne m'attend que dans une heure ?...
Ah ! Ah ! vous riez jaune,
et vous sentez trembler
sous vos pieds géométriques,
les piédestaux de votre puissance millénaire !
C'est que, je vous l'avoue cordialement,
mon moteur a parfois des vitesses étonnantes !...
Sachez donc qu'un esprit aussi fort que le mien
peut donner à une heure l'ampleur d'une semaine,
ou la serrer dans son poing dur
comme un citron,
dont coulera seulement
le jus d'un tout petit quart d'heure !... »

1- Conférence donnée le 8 décembre 2001 à l'Unesco (Paris), lors du colloque « 2001 : *L'Odyssée de l'espace* ».

Les vitesses en astrophysique¹

Dans l'Univers, tout est en mouvement, depuis les grains météoritiques jusqu'aux galaxies, en passant par les planètes et les étoiles. Lui-même est en mouvement et a une « vitesse d'expansion ». Dans la plupart des cas, la gravitation est responsable du mouvement ; elle est en effet équivalente à une accélération, elle-même dérivée d'une vitesse.

Comment mesure-t-on les vitesses ? Que nous apprennent-elles et comment, à partir de ces mesures, découvrir de nouvelles planètes ou des trous noirs ? Ces questions naturelles, sur lesquelles les astronomes ont longtemps buté faute de bonnes théories du mouvement et de techniques instrumentales précises, ont aujourd'hui des réponses riches et variées.

Petit panorama des vitesses cosmiques

Toute vitesse est comprise entre 0 et la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 km/s, que pour simplifier nous arrondirons à 300 000). Ces deux limites ne peuvent être atteintes. En effet, sur le plan de la thermodynamique, pour que la vitesse d'agitation des particules d'un système soit strictement nulle, il faudrait que la température atteigne le zéro absolu ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) ; or ce dernier est inaccessible en vertu du principe d'incertitude de Heisenberg qui, en physique quantique, interdit de figer complètement le mouvement des particules. D'autre part, en théorie de la relativité, toute augmentation de vitesse d'un corps massif correspond à une augmentation de son énergie ; or cette énergie tend vers l'infini lorsque la vitesse tend vers celle de la lumière dans le vide. En réalité, le « bon » paramètre physique pour parler du mouvement en relativité n'est pas la vitesse, mais l'énergie. L'énoncé « rien ne peut dépasser la vitesse de la lumière » (qui choque souvent le public par son côté péremptoire) ne traduit donc rien d'autre que l'impossibilité de dépasser l'infini.

Ces précautions liminaires étant prises, dressons d'abord un petit inventaire des vitesses typiquement rencontrées en astronomie, des plus lentes aux plus rapides :

— oscillations de matière à la surface du Soleil : quelques cm/s ;

- vitesse orbitale dans le système solaire, au voisinage de la Terre : 30 km/s ;
- vitesse typique des étoiles dans une galaxie (par exemple, vitesse de rotation du Soleil autour du centre de la Galaxie) : 200 km/s ;
- vitesse moyenne d'agitation des galaxies dans un amas de galaxies : quelques centaines de km/s ;
- vitesse de chute de la galaxie vers le Grand Attracteur : 600 km/s ;
- vitesse d'expansion des débris d'une supernova : de quelques dizaines à quelques milliers de km/s ;
- rayons cosmiques : près de 300 000 km/s ;
- vitesse d'effondrement gravitationnel d'un astre massif en trou noir : pratiquement 300 000 km/s ;
- neutrinos : pratiquement la vitesse de la lumière dans le vide ;
- ondes gravitationnelles : strictement la vitesse de la lumière dans le vide.

À propos de la lumière, notons que les photons (corpuscules de lumière) peuvent interagir avec le milieu qu'ils traversent et être en quelque sorte « ralentis ». La vitesse de la lumière dans un milieu est donc inférieure à ce qu'elle est dans le vide. En revanche, les particules élémentaires appelées « neutrinos » n'interagissent que très faiblement avec la matière, et sont de masse si petite qu'elles se déplacent pratiquement à la vitesse de la lumière dans le vide. On arrive ainsi à une situation apparemment paradoxale, dans laquelle l'information issue du cœur des étoiles se propage plus rapidement par les neutrinos que par la lumière. En effet, les réactions thermonucléaires qui se déroulent au centre du Soleil engendrent à la fois des neutrinos et des photons. Les neutrinos mettent à peu près huit minutes pour nous parvenir (temps nécessaire pour parcourir 150 millions de kilomètres à la vitesse de 300 000 km/s), alors que les photons mettent en moyenne plusieurs millions d'années, car ils sont considérablement ralentis durant leur traversée des couches gazeuses du Soleil ! De même, lors de l'explosion d'une supernova détectée en 1987 dans le Grand Nuage de Magellan, les neutrinos sont parvenus sur Terre quelques heures avant les photons lumineux.

Mis à part ces vitesses réelles, dites « propres », les astronomes peuvent aussi mesurer des vitesses « apparentes » qui, n'étant pas des vitesses de déplacement réel, peuvent dépasser celle de la lumière. C'est notamment le cas pour la vitesse de fuite des galaxies, due à la dilatation de l'espace (expansion de l'Univers) et non pas à un déplacement réel des galaxies. C'est aussi le cas pour les « jets superluminiques » émis par certaines radiogalaxies, dont la vitesse

apparemment supérieure à celle de la lumière est une illusion d'optique due à des effets de relativité.

Mesure des vitesses

Le vecteur vitesse d'une source par rapport à l'observateur a deux composantes : une composante *radiale*, dans la direction de l'observateur, et une composante *tangentielle*, dans la direction perpendiculaire.

Seule la vitesse tangentielle peut être mesurée directement en observant le déplacement apparent de l'astre sur la voûte céleste. Ces déplacements ne sont décelables que sur les astres proches : les planètes et autres corps du système solaire, bien entendu, mais aussi les étoiles proches (dont on mesure le « mouvement propre »).

Pour les vitesses radiales (correspondant soit à un rapprochement, soit à un éloignement de la source, mais sans déplacement apparent sur la voûte céleste), la spectroscopie fournit une méthode universelle de mesure grâce à l'*effet Doppler*. En vertu de cet effet, toute vitesse radiale de la source par rapport à l'observateur induit un décalage des fréquences reçues par rapport aux fréquences émises. Par exemple, lorsqu'une sirène émet des ondes sonores à la vitesse du son et se déplace par rapport à des auditeurs, les ondes circulaires ont tendance à s'empiler lorsque la sirène s'approche. Le nombre apparent d'ondulations par seconde, c'est-à-dire la fréquence de réception, augmente, et corrélativement la longueur d'onde diminue : le ton de la sirène devient plus aigu ; à l'opposé, les ondes émises par la sirène qui s'éloigne semblent s'étirer, et sont perçues sur un ton plus grave. On peut remplacer la sirène par une source lumineuse, et l'effet Doppler affecte de la même façon les fréquences électromagnétiques. Pour la lumière, le décalage est dit « vers le bleu » (plus petites longueurs d'onde) si la source se rapproche, « vers le rouge » (plus grandes longueurs d'onde) si la source s'éloigne.

Les applications de l'effet Doppler sont universelles. Elles permettent par exemple de détecter la présence d'*astres invisibles* autour d'étoiles et même, en appliquant les lois de Kepler, de les « peser ».

Grâce à la précision accrue des spectromètres, trois des domaines les plus fascinants de l'astrophysique moderne ont récemment fait un gigantesque bond en avant.

- La détection des *trous noirs*

Ces astres, prédits par la théorie de la relativité générale, semblent enfin avoir été détectés, tant à l'échelle des étoiles (trous noirs stellaires) qu'à celle des noyaux de galaxies (trous noirs géants), grâce à l'analyse des vitesses de la matière visible qui gravite dans

leurs parages.

- La détection de *planètes extra-solaires*

Le déplacement périodique des raies spectrales d'une étoile visible (correspondant à des vitesses aussi petites que 10 m/s) signale la présence de planètes. Actuellement, une demi-douzaine de systèmes planétaires ont été découverts².

- La détection de la *matière sombre*

La mesure de la vitesse de rotation des étoiles dans les galaxies spirales ou de la vitesse d'agitation des galaxies dans un amas indique la présence de matière non lumineuse, en quantité au moins dix fois supérieure à celle de la matière lumineuse.

Le décalage vers le rouge du spectre des galaxies est la découverte majeure du XX^e siècle dans le domaine de la cosmologie. Elle a, en effet, ouvert la voie au modèle d'*univers en expansion*. La « loi de Hubble » traduit une relation à peu près linéaire entre la vitesse de fuite apparente des galaxies et leur éloignement. Les vitesses de fuite apparentes des galaxies ou quasars les plus lointains dépassent 200 000 km/s. La frontière de l'univers observable, appelée « horizon des particules », correspond en fait à la distance à laquelle les vitesses de fuite apparente atteindraient la vitesse de la lumière ; cette distance est de l'ordre de 15 milliards d'années-lumière.

Toujours dans le domaine de la cosmologie, l'application récente la plus étonnante de l'effet Doppler concerne le « fond diffus cosmologique », ce vestige refroidi de l'univers primitif qui se manifeste par un rayonnement micro-ondes présent dans toutes les directions du ciel. Les mesures très précises des variations de la température de ce fond diffus en fonction de la direction d'observation permettent de déterminer la vitesse de la Terre (en direction et en grandeur) par rapport à un référentiel spatio-temporel connu. On en déduit la vitesse de chute de notre galaxie vers une hypothétique grande structure, le *Grand Attracteur*. Cette prédiction théorique a été confirmée de façon éclatante en 1996, par la découverte effective de ce superamas de galaxies, dont la masse est si importante qu'elle gouverne la dynamique d'une vaste portion d'univers dans laquelle nous sommes plongés.

Ainsi, l'analyse des vitesses en astrophysique permet d'accéder à de nombreuses propriétés de l'Univers jusqu'ici demeurées secrètes.

1- Conférence donnée le 27 mars 1997 à Paris aux 8^e entretiens de la Villette, Centre national de documentation pédagogique.

2- En 2011 nous en sommes à plusieurs centaines. Il est probable que la plupart des étoiles sont entourées de planètes [Note ajoutée pour la présente édition].

Trous noirs

« Je suis un homme : je fais un trou dans l'espace avec mon cerveau. »

Valère NOVARINA,
La Scène.

Des puits sans fond¹

« Dieu écrit droit avec des courbes », a dit un penseur franc-maçon du XVIII^e siècle. Voulant déchiffrer cent cinquante ans plus tard l'écriture des lois universelles de la gravitation, Einstein reprend la formule à sa façon. La gravitation déforme l'espace et le temps : les règles ne sont pas droites, les horloges ne battent pas partout le même rythme. L'espace-temps empli de matière redevient élastique, après avoir été figé par trois siècles de physique galiléo-newtonienne.

La déformation causée par un corps incrusté dans le mollusque espace-temps peut se visualiser par un puits : plus le corps est massif et dense, plus le puits est profond. Peut-il exister des puits sans fond, dont rien ne peut sortir, ni particule ni rayonnement ? La théorie répond oui : les trous noirs. Quant à la nature, elle répond plutôt favorablement.

C'est que la gravitation a des propriétés aux conséquences vertigineuses : elle est attractive, sa portée est infinie et son intensité locale croît avec la quantité de matière. La gravitation a donc naturellement tendance à concentrer la matière, par là même à augmenter sa propre intensité, donc à concentrer davantage la matière, et ainsi de suite... Chaque étoile passe d'ailleurs sa vie à lutter contre sa propre gravitation ; chacun de ses atomes est attiré vers le centre et l'étoile est perpétuellement menacée d'effondrement gravitationnel. Bien sûr, il existe des freins à cet effondrement. Dans la matière ordinaire, les forces électriques structurant les atomes s'y opposent en maintenant à distance les éléments constitutifs de la matière. Dans les étoiles chaudes, c'est la radiation thermonucléaire issue du centre qui égalise la gravitation ; et même dans les étoiles froides et compactes comme les naines blanches ou les étoiles à neutrons, il y a des forces de répulsion entre particules qui résistent à l'effondrement total. Mais pour les étoiles trop massives, la lutte contre la gravitation est perdue d'avance : au-delà d'un certain seuil, rien ne peut plus arrêter la contraction gravitationnelle. Le trou noir couronne alors le triomphe ultime de la gravitation dans son rôle de régulateur de la vie d'une étoile.

Les propriétés des trous noirs sont si spectaculaires qu'elles ont

longtemps nui à la crédibilité de la théorie, tout en faisant la joie des amateurs de sensationnel. La théorie prédit notamment l'existence de trous noirs de toutes tailles et de toutes masses. Un trou noir d'un centimètre pèserait autant que la Terre tout entière ; les trous noirs stellaires auraient une masse comparable à celle d'une étoile mais concentrée dans un rayon de quelques kilomètres ; les trous noirs géants rassembleraient plusieurs millions, voire plusieurs milliards de masses solaires dans un volume bien plus petit que celui du système solaire. Et cela n'est que le début d'une longue et fascinante histoire où l'on parle d'horizons, de chevelures, de marées, etc.

Si l'existence réelle de telles concentrations de matière n'est pas encore définitivement prouvée par l'observation astronomique, les indices s'accumulent, à tel point que dans nombre de situations le modèle du trou noir est devenu l'explication conventionnelle, c'est-à-dire celle qui bouleverse le moins les lois de la physique.

Ce n'est qu'à partir des années 1960 que les astronomes ont commencé à considérer les trous noirs autrement que comme une spéculation farfelue de théoricien ; ils venaient en effet de découvrir les phénomènes les plus énergétiques jamais observés dans l'Univers : sources X binaires à l'échelle stellaire, radiosources et quasars à l'échelle galactique. Le point crucial est que tous ces phénomènes sont liés à la présence de corps massifs et très compacts : étoiles à neutrons ou trous noirs stellaires pour les sources X binaires, amas compact d'étoiles ou trou noir géant dans les noyaux de galaxies.

Il est facile de comprendre pourquoi un trou noir est capable de susciter dans son environnement immédiat des événements très énergétiques ; si un objet quelconque tombe en chute libre à la surface de la Terre, il libère de la chaleur ; s'il tombe à la surface d'une naine blanche ou d'une étoile à neutrons, dont le champ gravitationnel est déjà beaucoup plus grand, il libère beaucoup plus d'énergie sous forme de rayonnement visible ou même de rayons X ; si enfin il tombe dans un trou noir, le champ gravitationnel de ce dernier est si grand qu'il provoque la libération d'une fraction appréciable de toute l'énergie que l'objet est capable de céder, qui n'est autre que son énergie de masse au repos donnée par la célèbre relation d'Einstein $E = mc^2$. C'est la raison pour laquelle un trou noir est le moteur le plus efficace de la nature pour convertir la masse-énergie d'un corps en rayonnement électromagnétique. Et c'est par le biais de ce rayonnement électromagnétique spécifique que l'on pense détecter, bien qu'indirectement, les trous noirs.

Des noms de trous noirs ? Dans le domaine des étoiles, les meilleurs candidats portent les appellations encore barbares de Cygnus X-1, GX 339-4 ou LMC X-3. Si on lorgne du côté des trous noirs géants, nul besoin de chercher dans les noyaux désespérément

lointains des quasars et autres galaxies super-actives, comme on le croyait jusqu'à présent ; aux dernières nouvelles (et des sérieuses, celles-là) il suffirait de regarder dans la constellation du Sagittaire, au cœur même de notre propre galaxie, à 30 000 années-lumière seulement. Quatre millions de masses solaires sont là, écrasées dans un tout petit volume. Et si cette chose-là n'était pas un trou noir, il faudrait refaire toute la physique parce que depuis le début on n'y aurait vraiment rien compris...

1- Article paru dans « L'Espace super star » *Revue Autrement*, n° 77 (février 1986).

Les trous noirs ¹

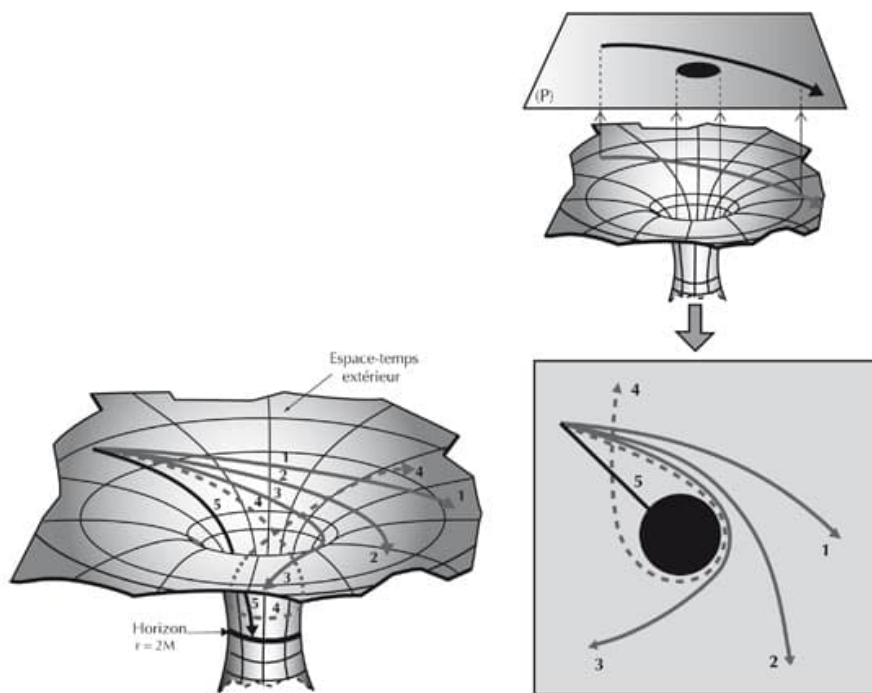
Les trous noirs : la plus fascinante découverte de l'astronomie moderne. Découverte récente, mais déjà légendaire, qui alimente mythes et fantasmes. Ces « puits dans l'espace-temps » existent-ils vraiment ? Et où doit-on les rechercher ? Pour répondre à ces questions, les astronomes qui traquent les « arlésiennes cosmiques » doivent innover, inventer de nouveaux télescopes, capables de percevoir l'infime lueur – la lumière gravitationnelle – qui s'échappe de ces puits d'ombre.

Les trous noirs sont sans doute l'une des découvertes les plus fascinantes de la science moderne. Leur paternité remonte pourtant à la fin du XVIII^e siècle, lorsque le révérend anglais John Michell et le célèbre mathématicien-astronome français Pierre Simon, marquis de Laplace, ont émis l'hypothèse que de grands astres obscurs, dont la masse prodigieuse capturerait inexorablement la lumière, pouvaient exister dans l'Univers. Malgré ces spéculations hardies, les astres obscurs furent vite oubliés. Ce sont les lois de la relativité générale, énoncées par Einstein cent cinquante ans plus tard, qui donnèrent aux trous noirs une assise théorique solide. Cette théorie de la gravitation, qui a bouleversé les notions les plus familières d'espace et de temps, a permis de comprendre que l'Univers n'est pas un cadre immuable, imperturbable, dans lequel se déroulent des phénomènes mus par des forces ; l'Univers est une structure « molle », à quatre dimensions (trois d'espace, une de temps), déformée par les masses qui s'y incrustent. Autrement dit, la gravitation n'est pas une mystérieuse force d'attraction émanant instantanément des corps massifs, mais elle est une manifestation de la *courbure* de l'espace-temps.

La distorsion de l'espace-temps associée à la gravitation se rattache aisément à la conception newtonienne si l'on visualise l'espace-temps comme un « tissu élastique », dans lequel chaque corps massif (planète, étoile, galaxie) creuse un puits gravitationnel, d'autant plus profond que le corps est plus concentré. Le trou noir représente un état théorique de concentration tel que son puits gravitationnel ne laisse rien sortir, pas même les rayons lumineux. En termes newtoniens, la vitesse de libération y est supérieure à

300 000 km/s ; en termes relativistes, le puits gravitationnel creusé dans l'espace-temps n'a pas de fond : c'est réellement un trou.

L'ESPACE-TEMPS COURBE ET L'ILLUSION NEWTONNIENNE DES FORCES DE GRAVITATION



Dans un espace-temps courbe, les lignes les plus courtes (les « géodésiques », analogues aux droites d'un plan) représentent les trajectoires possibles des corps en chute libre et des rayons lumineux. Ici, on voit le tissu élastique de l'espace-temps fortement déformé par la présence d'un trou noir qui y creuse un puits gravitationnel. Les trajectoires 1, 2, 3, passant de plus en plus près du centre, sont de plus en plus infléchies par la courbure. La géodésique 4 plonge momentanément dans le puits et se recoupe elle-même en ressortant. La géodésique 5 tombe radialement dans le trou et ne remonte pas.

Lorsqu'on projette cette figure sur le plan (P), on retrouve l'illusion newtonnienne d'un Univers plat (sans courbure), dans lequel les particules seraient déviées de la ligne droite par des forces de gravitation, au lieu d'épouser librement les contours d'une géométrie courbe sous-jacente.

Les trous noirs existent-ils réellement, et si oui, où et comment peut-on les observer ? Pour répondre à ces questions, l'astrophysique moderne a pris le relais de la relativité ; elle a notamment permis de comprendre que, par le mécanisme de l'effondrement gravitationnel, des trous noirs de toutes tailles et de toutes masses pouvaient se former dans l'Univers et que leur quête n'est pas absurde : les trous noirs peuvent se manifester à nous par des effets qui, bien qu'indirects, n'en sont pas moins accessibles à l'observation. Certes, un trou noir isolé est, par sa définition même, condamné à l'invisibilité. Cependant, un trou noir « naturel » n'est jamais complètement nu.

Baignant au moins dans le milieu interstellaire, ou mieux dans un environnement riche en gaz et en étoiles, il draine la matière ambiante, et l'une de ses fonctions essentielles est de s'en nourrir ; or un trou noir qui mange laisse toujours des restes : la matière avalée signale sa disparition par une émission de rayonnement électromagnétique. C'est ce dernier que les astronomes s'évertuent à détecter. En réalité, comme nous allons le voir, les trous noirs pourraient bien être la clé des phénomènes les plus lumineux de l'Univers !

Puisque les étoiles appartiennent fréquemment à des systèmes multiples, les trous noirs, en tant que résidus stellaires, n'échappent pas au lot commun et nombre d'entre eux doivent appartenir à des couples, des « binaires ». Or la vie à deux est sans doute, pour un trou noir, le meilleur moyen de se faire remarquer des astronomes.

Les systèmes binaires dans lesquels se trouve une étoile effondrée sont en effet faciles à repérer : le destin d'une étoile est profondément influencé par la vie de couple, d'autant plus que celui-ci est serré. Isolés, les résidus stellaires compacts, à la surface minuscule, sont pratiquement invisibles (hormis les pulsars, qui sont des étoiles à neutrons rayonnant dans le domaine radio) ; accouplés, ils sont réellement transfigurés. Dans le cas des naines blanches, la binarité est source d'épisodes éclatants tels que les variables cataclysmiques et les novæ. Dans le cas des étoiles à neutrons et des trous noirs, la transfiguration est encore plus spectaculaire. Elle se manifeste par un véritable zoo de phénomènes cosmiques de très haute énergie, dont la caractéristique commune est de se dévoiler dans le domaine des rayons X. C'est la raison pour laquelle il a fallu attendre l'avènement de l'ère spatiale pour s'apercevoir que l'Univers est bien plus « violent » qu'on ne le croyait jusqu'alors (les rayons X sont en effet arrêtés par l'atmosphère terrestre), et que notre galaxie en particulier est peuplée de sources X binaires.

Les sources X binaires montrent divers signes d'activité. Certaines sont parfaitement régulières, attestant la présence d'étoiles à neutrons en rotation. Ce sont des pulsars X. D'autres sont erratiques. Ce sont des sursauteurs. Les sursauteurs sont des étoiles compactes agitées de brutales éruptions de rayons X durant quelques secondes. Notre galaxie n'abrite qu'une centaine de telles sources ; cette rareté s'explique par la brièveté de la phase d'émission X dans un système binaire : dix mille années seulement, c'est-à-dire un éclair, comparé à la durée de vie moyenne des étoiles. En l'absence de toute périodicité, on ne peut pas affirmer qu'il s'agit d'étoiles à neutrons. Les trous noirs stellaires sont donc à rechercher parmi les sursauteurs.

Comment reconnaître, dans un sursauteur, la nature de la composante compacte responsable de l'émission X ? Le chasseur de

trous noirs dispose en principe d'une arme absolue : la balance. Il sait en effet, grâce aux développements de l'astrophysique théorique des années 1930-1940, que les naines blanches et les étoiles à neutrons, dont le cœur est devenu thermonucléairement inerte, sont incapables de supporter plus de deux ou trois masses solaires : au-delà, la gravitation doit irrésistiblement l'emporter sur toute résistance interne de la matière et les étoiles compactes doivent s'effondrer en trous noirs. Par conséquent, si dans une binaire la mesure de la masse de la composante compacte donne une valeur supérieure à 3 masses solaires (M_s), la physique moderne n'offre pas d'autre possibilité que le trou noir !

À l'heure actuelle, trois sources X binaires satisfont au critère du trou noir² : il s'agit de Cygnus X-1, de LMC X-3 (située non pas dans notre galaxie, mais dans la galaxie voisine, le Grand Nuage de Magellan), et de A 0620-00. Les deux premières sont des binaires « massives » en ce sens que la composante visible est une grosse étoile massive et bleue, la troisième est une binaire « naine » car la composante visible est une petite étoile de 0,7 M_s de type spectral avancé ; c'est pourtant dans celle-ci que l'existence d'un trou noir, dont la masse dépasserait 7 M_s , est la plus probante.

Livrons-nous maintenant à un rapide calcul. Admettons que notre galaxie produise une supernova par siècle depuis dix milliards d'années, et qu'une supernova sur cent engendre un trou noir (ces chiffres sont plutôt pessimistes). On en conclut que la Galaxie devrait abriter au moins un million de trous noirs stellaires. On peut être déçu de n'en trouver que trois, mais on se souvient que la phase d'émission X, qui permet de les repérer, ne représente qu'un minuscule épisode de leur évolution. Il existe d'ailleurs d'autres candidats trous noirs sérieux, telle la fabuleuse étoile-galaxie SS 433, qui expulse des jets symétriques de gaz à la vitesse de 78 000 km/s. Si ces candidats ne sont pas encore « homologués », c'est que l'imprécision des observations ne permet pas de certifier que leur masse dépasse le seuil fatidique des 3 M_s .

Outre les trous noirs produits par l'évolution des étoiles, dont la masse ne peut guère dépasser une dizaine de fois celle du Soleil, la théorie de l'effondrement gravitationnel permet d'envisager l'existence de trous noirs de mille, un million, voire un milliard de masses solaires. On connaît trois mécanismes plausibles susceptibles d'engendrer des trous noirs géants. Il peut s'agir de trous noirs primordiaux, formés par condensation de gros grumeaux dans la pâte de l'Univers primitif il y a plus de dix milliards d'années. Un autre mécanisme fait appel à la tendance au grossissement irréversible qui est l'une des propriétés les plus frappantes des trous noirs ; dans ce schéma, un trou noir supermassif peut résulter de la croissance d'un

germe initial de dix masses solaires, engendré dans le cœur d'une supernova, pourvu que son environnement stellaire et gazeux lui fournisse une nourriture suffisante. Le troisième mécanisme de formation n'est autre que l'effondrement gravitationnel direct d'un amas d'étoiles.

Où chercher les trous noirs géants ? Là où il y a le plus de matière, c'est-à-dire au cœur des galaxies. Commençons par la nôtre. On peut observer le centre de la Galaxie au moyen des radiotélescopes et des satellites artificiels détecteurs de rayonnement X et infrarouge (les autres longueurs d'onde sont absorbées par les gigantesques bancs de poussières obscures qui peuplent la Voie lactée). Le centre abrite une radiosource baptisée Sagittarius A, remarquable par sa compacité : elle tiendrait dans l'orbite de Saturne. Il est impossible de « caser » un amas d'étoiles dans un volume aussi réduit. L'hypothèse d'un trou noir de quelques millions de masses solaires, en état d'accrétion lente, est à l'heure actuelle le seul modèle compatible avec toutes les observations radio. Elle est de plus corroborée par les observations infrarouges. En effet, l'émission infrarouge du centre galactique, baptisée IRS 16, présente également toutes les caractéristiques d'une source compacte et massive. L'analyse du mouvement des nuages gazeux près du centre permet de calculer que, dans un rayon de 5 années-lumière, deux millions d'étoiles doivent graviter autour d'une masse centrale obscure unique de 3 à 6 millions de masses solaires.

Ces arguments sont certes convaincants, mais la preuve définitive du trou noir géant galactique est loin d'être acquise³.

Historiquement (et hormis la spéculation prématurée de Michell et Laplace), l'hypothèse des trous noirs géants fut invoquée pour expliquer l'activité intense de certains noyaux de galaxies. Dans 1 % de toutes les galaxies observées, l'activité centrale est si vive que l'énergie dégagée dans un volume aussi petit que celui du système solaire est bien plus grande que celle de la galaxie-hôte. Ces galaxies à noyau actif ont un formidable moteur à la place du cœur. Un cas exemplaire est celui du quasar 3C 273. Situé à 3 milliards d'années-lumière, 3C 273 a l'éclat d'un millier de galaxies ; or, comme l'indique son apparence ponctuelle, sa taille est extrêmement réduite : inférieure à une année-lumière. Comparé au volume total occupé par notre galaxie, le quasar 3C 273 est aussi minuscule que la tour Eiffel par rapport au globe terrestre. Comment peut-il être mille fois plus brillant ? Un autre exemple célèbre est celui des radiogalaxies, qui éjectent depuis leur centre de gigantesques jets gazeux à des vitesses proches de celle de la lumière.

Moyennant un certain nombre d'hypothèses raisonnables, la seule mesure du flux lumineux permet d'évaluer la masse d'un noyau actif :

les luminosités des noyaux actifs s'échelonnant entre cent milliards et un million de milliards de fois la luminosité du Soleil, leurs masses sont comprises entre un million et dix milliards de masses solaires. On pense aujourd'hui que l'accrétion de matière par un trou noir géant est la clé de la prodigieuse activité des galaxies. Pourquoi invoquer des trous noirs géants pour libérer une telle énergie ? Le lecteur se souvient qu'à l'échelle stellaire, les sources X binaires fonctionnent déjà à l'énergie gravitationnelle : lorsqu'un kilogramme d'hydrogène tombe progressivement dans un trou noir en parcourant un disque d'accrétion, cent grammes sont transformés en énergie par le champ gravitationnel. Un tel rendement est notoirement meilleur que celui des réactions thermo-nucléaires qui se déroulent au cœur des étoiles, où sept grammes seulement sont dissipés en énergie radiative. Cette simple constatation des formidables possibilités énergétiques des champs gravitationnels forts a conduit les astrophysiciens à s'intéresser de près aux astres compacts pour expliquer les phénomènes les plus violents, que ce soit à l'échelle stellaire avec les novæ et les sources X, ou à l'échelle des noyaux de galaxies.

Ces remarques théoriques, suggérant une masse compacte importante dans les noyaux de galaxies, resteraient un peu vaines si aucune observation ne venait les corroborer. Il existe deux méthodes permettant de mesurer approximativement des masses concentrées, mais elles ne sont applicables qu'aux galaxies relativement proches. La première consiste à étudier la distribution de la lumière stellaire près du centre. Si une importante masse centrale est présente, les étoiles attirées dans le puits gravitationnel doivent s'accumuler et renforcer de manière inhabituelle la luminosité. La seconde méthode consiste à déduire la masse à partir du mouvement de la matière environnante. Il s'agit plus précisément de mesurer les vitesses d'agitation des étoiles ou de nuages émetteurs près du centre ; en les interprétant comme celles d'un mouvement circulaire autour d'une masse centrale et en appliquant les lois de la mécanique céleste, on en déduit la valeur de cette masse. Depuis l'exemple historique et controversé du noyau de la galaxie elliptique M. 87, qui en 1978 avait été interprété en termes d'un trou noir compris entre 3 et 5 milliards de masses solaires, un grand nombre de noyaux actifs ont été observés par ces deux techniques ; les masses centrales sont généralement comprises entre dix et cent millions de masses solaires, confirmant pleinement les prédictions théoriques.

Ce qu'il y a aussi de particulièrement intéressant avec le modèle des trous noirs géants, c'est que l'observation des galaxies dites « normales » – celles dont le noyau est moins lumineux que le reste – révèle maintes caractéristiques communes aux noyaux actifs. Nous l'avons vu pour le centre de notre propre galaxie. Pour la galaxie

d'Andromède, sa voisine, les déterminations les plus récentes donnent une masse obscure de dix millions de masses solaires. Quant à Messier 32, l'une des galaxies satellites d'Andromède, une elliptique naine cent fois moins massive que son compagnon et totalement inactive, elle semble renfermer aussi un noyau obscur et concentré de 5 millions de masses solaires !

En 1969, l'astrophysicien anglais Lynden-Bell avait envisagé que tous les noyaux de galaxies puissent abriter des trous noirs géants, dont le débit serait régulé par la quantité de carburant gazeux disponible. Les développements de l'astronomie extragalactique sont venus étayer cette magnifique hypothèse. Certes, en comparaison des galaxies actives de Seyfert, et surtout des quasars, le trou noir galactique ou celui d'Andromède ne seraient que de piètres moteurs, versions miniaturisées des phénomènes cataclysmiques se déroulant au cœur des galaxies les plus lointaines ; mais il n'est pas impossible que le moteur en « sous-régime » s'allume de nouveau prochainement pour peu qu'une étoile lui fournisse du carburant...

Du plus modeste au plus brillant, un noyau actif de galaxie requiert la digestion d'une quantité de gaz comprise entre un centième et cent masses solaires par an. Le problème de l'approvisionnement est posé. Or, dans une galaxie, les étoiles sont le principal réservoir de gaz. Pour se nourrir convenablement, un trou noir géant doit donc briser des étoiles et extirper tout leur gaz. Un trou noir géant est parfaitement capable de gober des étoiles entières ; auprès d'un trou noir d'un milliard de masses solaires, le Soleil serait comme un grain de sable près d'un ballon de football. Cette façon de gober les étoiles ne produit toutefois guère d'énergie : tout disparaît dans le trou. La situation idoine est celle où l'étoile est cassée hors du trou, de façon que ses fragments puissent alimenter un disque d'accrétion.

Il existe deux événements susceptibles d'extraire toute la substance d'une étoile. Le premier est la collision de deux étoiles au voisinage du trou noir, le second est la rupture d'une étoile individuelle par les forces de marée du trou noir. Il semble que les collisions interstellaires ne soient capables d'alimenter que les quasars contenant de très gros trous noirs ; pour les noyaux moins actifs, abritant un trou noir moins massif, la fréquence des collisions interstellaires serait si faible qu'elles ne joueraient probablement aucun rôle, le phénomène prépondérant étant alors l'éclatement d'une étoile par les forces de marée. Des travaux théoriques récents, réalisés par l'auteur et ses collaborateurs, ont montré que les étoiles passant à l'intérieur d'une certaine zone critique autour d'un trou noir géant sont aplaties en crêpe et rompues par les effets de marée ; les gaz libérés tombent vers le trou noir et émettent le rayonnement observé. Les « crêpes stellaires » peuvent même exploser sous l'effet de

réactions thermonucléaires accidentelles, déclenchées par le champ gravitationnel extérieur du trou noir.

Einstein s'était demandé si une masse en mouvement accéléré pouvait rayonner des ondes de gravitation, de la même façon qu'une charge électrique en mouvement accéléré rayonne des ondes électromagnétiques ; dès 1918 il découvrit effectivement des solutions de ses équations du champ gravitationnel représentant des ondulations de la courbure de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière. Il venait d'inventer la « lumière gravitationnelle ». Mais les ondes gravitationnelles sont extraordinairement faibles. Il est notamment impossible d'en engendrer en laboratoire, et même les phénomènes astronomiques ordinaires émettent une lumière gravitationnelle ridiculement faible. Il faudrait cinquante milliards de météores de 1 kilomètre de diamètre percutant la Terre à 10 km/s pour faire briller une modeste ampoule électrique (il n'y aurait d'ailleurs plus personne pour constater le résultat) ! Pour engendrer des ondes gravitationnelles qui ne soient pas totalement insignifiantes, l'astre générateur doit se déplacer à une vitesse proche de celle de la lumière et être compact, c'est-à-dire proche de son rayon critique.

Le trou noir, astre relativiste par excellence, est bien entendu la source la plus prolifique de rayonnement gravitationnel. Certes, l'effondrement exactement sphérique d'une étoile en trou noir ne produit pas d'ondes, mais les étoiles et les trous noirs réels étant en rotation, il existe toujours des mouvements asymétriques permettant à la lumière gravitationnelle de jaillir. Le premier cri d'un trou noir nouveau-né est un éclair de lumière gravitationnelle transportant une énergie comparable à son énergie de masse au repos. La luminosité gravitationnelle de deux trous noirs de dix masses solaires entrant en collision est cent millions de fois plus grande que la luminosité électro-magnétique du plus puissant quasar ! Un tel événement se déroulant au centre de notre galaxie, à 30 000 années-lumière de distance, produirait un flux détectable sur Terre par les instruments actuels.

On pressent donc l'émergence, pour le siècle prochain, d'une nouvelle astronomie aux exigences extrêmes. Ce sera une astronomie d'une transparence incomparable, car, au contraire de la lumière électromagnétique, la lumière gravitationnelle n'est pas absorbée par la matière, et issue de sources lointaines elle peut parvenir à la Terre en transportant une information inaltérée sur la configuration des sources qui l'ont engendrée. De plus, les sources les plus prolifiques sont justement celles sur lesquelles l'observation électromagnétique n'apporte qu'une information sommaire et indirecte : couples d'étoiles à neutrons, cœurs de supernovæ, trous noirs, etc. Voilà pourquoi l'astronomie gravitationnelle ouvrira une nouvelle fenêtre sur

l'Univers le plus mystérieux, permettant d'accéder non seulement aux propriétés inconnues des astres compacts et de la matière ultradense, mais aussi, peut-être, d'assister enfin aux véritables débuts de l'Univers il y a quinze milliards d'années.

1- Article paru en mars 1988 dans la revue *Ciel et Espace* (n° 223).

2- Depuis, la liste des « candidats » s'est remarquablement allongée et compte une bonne vingtaine de sources X binaires, dans lesquelles l'existence d'un trou noir ne fait plus guère de doute. Pour plus de détails, voir le chapitre 19 de mon ouvrage *Le Destin de l'Univers*, Folio Essais, 2010 [Note ajoutée pour la présente édition].

3- Là encore, les progrès de l'observation ont permis de cerner avec une quasi-certitude l'existence du trou noir galactique et d'en mesurer la masse, qui est de 4 millions de masses solaires. Voir chapitre 20 du *Destin de l'Univers*, op. cit. [Note ajoutée pour la présente édition.]

Comment s'en sortir¹

(à propos de S. Hawking)

Dans son livre *Une brève histoire du temps*, Stephen Hawking consacre une quarantaine de pages aux trous noirs. La proportion (près d'un cinquième) est certainement justifiée dans la mesure où Hawking est l'un des « pères spirituels » de ce concept issu de la relativité générale.

En termes simples (c'est-à-dire non relativistes), un trou noir est un astre condensé dont l'attraction gravitationnelle est si intense qu'elle empêche toute matière et tout rayonnement de s'échapper. Le théoricien anglais nous rappelle à juste titre que cette notion remonte à la fin du XVIII^e siècle avec Michell et Laplace. Le calcul de ces deux précurseurs reposait sur le concept newtonien de vitesse de libération. En admettant que la lumière soit composée de corpuscules émis à la vitesse de 300 000 km/s et soumis aux lois de la mécanique newtonienne, ils prédirent qu'elle ne pourrait pas s'échapper d'un corps dont le rayon serait plus petit qu'une certaine valeur critique. Pour un astre ayant la densité moyenne du Soleil, ce rayon serait de 150 millions de kilomètres et la masse correspondante de 10 millions de masses solaires.

Les choses en sont restées là jusqu'à ce que la théorie de la relativité générale, élaborée par Einstein en 1915, établisse l'influence de la gravitation sur la lumière et fournisse une assise théorique solide aux corps gravitationnellement condensés. Hawking précise toutefois qu'il fallut attendre les progrès dans la compréhension de l'évolution stellaire pour que la notion de trou noir réapparaisse dans le champ d'investigation physique. Dans les années 1930, Chandrasekhar et Landau ont en effet découvert qu'il existe une masse limite au-dessus de laquelle un astre « froid » (disons sans réactions thermonucléaires) ne peut plus rester en équilibre, mais doit s'effondrer sous son propre poids. Le Soleil terminera sa vie sous forme de naine blanche, équilibrée par la pression interne d'électrons dits « dégénérés ». Les étoiles un peu plus massives explosent en supernova et leur cœur forme une étoile à neutrons, à la compacité extraordinaire (un milliard

de tonnes par centimètre cube) équilibrée par la pression interne de neutrons dégénérés. Pour les étoiles encore plus massives, cependant, l'effondrement semble ne plus pouvoir être stoppé par une résistance de la matière et doit se poursuivre sans limite. Toutefois, avant d'atteindre ce stade « singulier » (où la densité deviendrait infinie), l'astre doit d'abord se contracter en dessous de son rayon critique. C'est à ce stade qu'il se coupe de toute communication avec le monde extérieur et devient invisible. Un trou noir est alors réellement formé, et l'on comprend dès lors que la surface d'un trou noir, appelée « horizon des événements », n'est qu'une surface géométrique sans consistance matérielle, contrairement aux croûtes solides des naines blanches et des étoiles à neutrons.

En termes de relativité générale, on sait que toute masse courbe l'espace-temps environnant. Les distorsions infligées par un trou noir à l'espace et au temps sont spectaculaires, et Hawking n'omet pas de préciser que pour tout astronome lointain, la surface du trou noir apparaît bien comme une frontière de l'espace-temps au-delà de laquelle il ne peut rien apercevoir. L'horizon des événements joue le rôle d'une membrane à sens unique divisant l'Univers en deux domaines ; matière et lumière peuvent passer du domaine extérieur au domaine intérieur, mais non l'inverse (un astronaute pourrait explorer l'intérieur d'un trou noir en participant à l'effondrement de la matière et de la géométrie, mais il ne pourrait plus en ressortir pour relater ses découvertes !).

La courbure de l'espace-temps au voisinage du trou noir est également responsable d'une distorsion temporelle et d'un décalage spectral vers le rouge qui deviennent infinis au rayon de Schwarzschild. Pour un observateur lointain, l'étoile en effondrement semble ralentir indéfiniment sa contraction à mesure qu'elle se rapproche du rayon critique. Pour un observateur en chute libre (donc participant à l'effondrement), la contraction de l'étoile se termine en $r = 0$, une singularité de l'espace-temps où la courbure (c'est-à-dire les forces de marée gravitationnelle) devient infinie.

Avec le mathématicien Roger Penrose, Hawking a apporté une contribution remarquable dans les années 1965-1970 sur l'occurrence de singularités, démontrant que la singularité finale de densité et de courbure à l'intérieur des trous noirs était inéluctable (de façon analogue à la singularité initiale de l'Univers lui-même, le Big Bang). Penrose a en outre postulé une conjecture dite de « censure cosmique », selon laquelle toutes les singularités gravitationnelles seraient nécessairement cachées au fond de trous noirs, donc inaccessibles à l'observation et sans influence sur l'univers extérieur. Si cette hypothèse est correcte, après une phase dynamique transitoire marquée par l'émission de rayonnement électromagnétique et

gravitationnel, une équipe de physiciens incluant W. Israël, B. Carter et D. Robinson a pu montrer que la géométrie extérieure d'un astre en effondrement doit atteindre une configuration stationnaire autour d'un horizon des événements, toutes les irrégularités étant dissipées par le rayonnement. Il y aurait donc un état final unique de l'effondrement gravitationnel sans limite, qui serait un trou noir en rotation et électrisé. Wheeler a décrit cette situation par la formule pittoresque « un trou noir n'a pas de chevelure ».

Hawking discute ensuite brièvement un aspect capital du concept de trou noir : leur existence réelle ! La quête observationnelle des trous noirs s'apparente à la patiente reconstitution d'un puzzle à partir de pièces rares. Les arguments indiquant leur présence possible tiennent de l'enquête policière, mobilisent l'extrême diversité des astres observables et des techniques de détection. Puisqu'ils n'émettent aucun rayonnement, le seul espoir de les reconnaître consiste à déceler sur leur environnement astronomique la trace de leur intense attraction gravitationnelle. Baignant dans un milieu riche en gaz et en étoiles, les trous noirs drainent la matière ambiante et s'en nourrissent ; la matière engloutie signale sa disparition par une émission de rayonnement électromagnétique que les télescopes s'emploient à détecter. Une majorité d'astrophysiciens croit aujourd'hui que des trous noirs de diverses tailles sont à l'origine de certains des phénomènes les plus lumineux de l'Univers : trous noirs stellaires dans les sources X binaires, trous noirs géants dans les noyaux de galaxies (radiosources et quasars).

La contribution sans doute la plus importante de Hawking à la physique théorique moderne reste (à ce jour) la prédiction du phénomène d'évaporation quantique des trous noirs, et le professeur de Cambridge y consacre tout un chapitre. Une première étape dans la compréhension des trous noirs en tant que systèmes physiques capables d'interagir avec de la matière ou du rayonnement extérieurs et d'évoluer au cours du temps a été la mise en place d'une « thermodynamique des trous noirs » calquée sur la thermodynamique usuelle. Hawking a justement démontré la loi de croissance irréversible de l'aire d'un trou noir, qui doit être mise en parallèle avec la loi de croissance de l'entropie. En outre, la gravité de surface d'un trou noir doit jouer le rôle d'une température. Un paradoxe surgit alors : si le trou noir possède réellement une température et une entropie, il doit être capable de rayonner de l'énergie, ce qui est en conflit avec sa définition classique !

Le dilemme a été résolu en 1974 par Hawking (un peu par hasard, reconnaît-il), lorsqu'il s'est mis en tête d'étudier l'interaction d'un trou noir avec le vide quantique. Dans la conception classique du trou noir, rien ne peut sortir de l'horizon. En mécanique quantique, au

contraire, en raison du principe d'incertitude, une particule a toujours une probabilité non nulle de franchir une barrière de potentiel par effet tunnel. Appliqué à la théorie des trous noirs microscopiques, le principe d'incertitude crée des tunnels quantiques à travers l'horizon gravitationnellement infranchissable et permet aux trous noirs de s'évaporer. L'évaporation de Hawking se manifeste sous forme d'un rayonnement de corps noir, dont la température est bien fixée par la gravité régnant à la surface du trou noir. Ces effets quantiques sont totalement négligeables pour les trous noirs de masse stellaire, mais Hawking a montré qu'ils deviendraient dominants pour les « mini-trous noirs » (de la taille d'un proton et moins massifs qu'un milliard de tonnes), dont le temps d'évaporation deviendrait plus court que l'âge de l'Univers (quinze milliards d'années). De tels objets auraient pu se former au cours du Big Bang, lorsque la densité d'énergie ambiante était si élevée que la moindre fluctuation aurait pu se condenser en minuscule trou noir.

Je terminerai avec le commentaire suivant. Hawking a toujours travaillé aux frontières les plus spéculatives de la physique théorique, généralement hors de portée des vérifications expérimentales liées aux technologies d'aujourd'hui. Voilà qui le marginalise du courant des physiciens « pragmatiques » qui estiment – à juste titre me semble-t-il – qu'une théorie, aussi belle soit-elle, n'a de vraie valeur que si elle supporte la confrontation avec l'observation. Il se trouve que Hawking a émis au moins une fois une prédiction théorique qui aurait pu être testée par l'observation astronomique. Il s'agit précisément de l'évaporation des mini-trous primordiaux, qui devrait se traduire par des bouffées de rayonnement gamma caractéristiques, parfaitement détectables par les instruments actuels. Or aucun indice observationnel n'a pu confirmer l'hypothèse de Hawking : ou bien les mini-trous noirs primordiaux n'existent pas ou bien, s'ils existent, soit ils ne s'évaporent pas, soit ils sont extrêmement rares. Ces résultats décevants n'ont heureusement pas découragé Hawking, qui s'est depuis engagé dans des spéculations bien plus « sauvages » que celles sur les trous noirs, puisqu'il prétend expliquer la naissance de l'Univers à partir des lois de la mécanique quantique. Mais c'est une autre histoire...

Une créature hybride¹

Cher Gérard,

Je me souviens de tes premières visites à l'Institut d'astrophysique de Paris, où je te voyais déambuler en long imperméable gris parmi nous autres les « savants », portant toujours un mystérieux grand sac dont, un jour enfin, sur une table de bistrot, tu m'as fièrement dévoilé le contenu : un fabuleux manuscrit médiéval enluminé, et deux ou trois autres trésors bibliophiles.

Puis il y eut ta question intriguée :

— Mais que peut bien faire un astrophysicien ?

— Euh... travailler sur les trous noirs, par exemple, ou sur le Big Bang !

— Et c'est quoi, exactement, un trou noir ?

— Oh, disons une créature hybride, enfantée par la géométrie riemannienne, la gravitation relativiste et la mécanique quantique. Ou, si tu préfères, un paradigme du problème de l'infini...

Là-dessus, il fallait lever le camp. Explications reportées. Explications jamais données.

Entre-temps, je me suis converti à la bibliophilie. Un jour, en visite de ton manoir, tu m'as perfidement dévoilé les bois gravés de ton exemplaire du *Kompost et Calendrier des Bergers*, et montré les somptueuses planches de la *Physique sacrée* du jésuite Scheuchzer racontant la création du monde. Tu m'as ensuite désigné d'un doigt impérieux quelques exemplaires poussiéreux des *Mémoires de l'Académie des sciences de Montpellier*. Dans le domaine de l'astronomie, rien de fulgurant ne fut jamais publié là-dedans, à l'exception d'un article *capital* d'Édouard Roche, le premier à comprendre les forces de marée dans le système solaire : « La figure d'une masse fluide soumise à l'attraction d'un point éloigné », *Acad. Sci. Montpellier*, vol. 1, 1847-1850, p. 243. Je connais ce texte par cœur, ayant moi-même rédigé mon doctorat d'État sur les effets de marée (non plus entre les planètes et leurs lunes, mais entre trous noirs géants et étoiles égarées ; quelle époque !).

Pour finir, j'ai eu le bonheur – ou l'infortune c'est selon – de

découvrir à la bibliothèque de l'Observatoire de Paris le mythique *Astronomicum Cæsareum* de Petrus Apianus, grand folio à figures mobiles coloriées à la main publié à Ingolstadt en 1540. Le César Charles Quint, à qui Apianus avait dédié le livre, avait été si enthousiasmé qu'il l'avait récompensé de 3 000 pièces d'or et l'avait ennobli.

Bref, depuis ces visions éblouies, j'erre dans les salles de ventes en quête de trésors accessibles, délaissant quelque peu mon ordinateur et mon laboratoire.

Il est donc juste que je t'inflige aujourd'hui les explications toujours différées sur ces fameux trous noirs. Te convertiras-tu en astronophile passionné ?

Le sujet est *grave*, au sens propre. Juges-en plutôt.

La gravité gouverne l'organisation du cosmos en assurant la cohésion des corps astronomiques, en dictant leur mouvement, leur évolution, leur destin. Comprendre sa nature est une question profonde qui a nourri la réflexion théorique des plus grands esprits : Galilée, Newton, Einstein. Parmi ses conséquences singulières figure l'effondrement gravitationnel : intuitivement, la gravitation est auto-accélératrice, puisque son attraction rapproche les particules, ce qui rend l'attraction plus intense, ce qui rapproche un peu plus les particules, et ainsi de suite. Le trou noir, c'est l'aboutissement ultime, presque poussé à l'absurde, d'un effondrement gravitationnel sans limite, triomphant de toute résistance de la matière.

La description des trous noirs relève d'un double langage. L'un fait appel au vocabulaire de la physique mathématique : « Un trou noir est la fermeture du plus petit ensemble du futur ayant les propriétés : (1) de contenir des surfaces occlusives non cosmologiques, (2) d'avoir une frontière engendrée par des segments de géodésiques nulles γ tels que, pour chaque γ , il existe un générateur α d'un passé irréductible terminal avec $\alpha \cap J^-(\gamma) = \gamma$. »

Ce jargon délicieusement ésotérique, décryptable par les seuls spécialistes de la relativité générale, est le fruit d'un approfondissement de la théorie d'Einstein qui s'est développé à partir des années 1960.

L'autre langage, plus « pédagogique », est celui de l'astronomie : « Un corps gravitationnellement condensé dont l'attraction est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper. » Cette conception vit le jour dès 1783 : John Michell, révérend anglais, géologue, astronome et philosophe, écrivit un article sur une méthode permettant de calculer la masse des étoiles en détectant le ralentissement de la lumière dû à l'effet de la gravitation sur les corpuscules de lumière. Michell faisait remarquer qu'un corps suffisamment dense et massif arrêterait complètement la lumière qu'il

émet, et serait donc invisible hormis par l'influence gravitationnelle qu'il exercerait sur une étoile voisine. En 1796, Pierre Simon, marquis de Laplace, parvint indépendamment au même résultat : un astre géant, de la taille de l'orbite terrestre et de la densité terrestre, emprisonnerait les rayons lumineux par son attraction gravitationnelle.

Que l'on ne s'y trompe pas : les véritables pères des trous noirs sont les spécialistes de la relativité générale : Einstein bien sûr, puis Oppenheimer, Wheeler, Penrose, Carter, Hawking et quelques autres. Le terme même de trou noir n'a été proposé qu'en 1968 ; on parlait auparavant d'astre invisible ou occlus, d'étoile gelée, de cercle magique ; il est par la suite devenu aussi populaire que le Big Bang – autre conséquence singulière de la gravitation, autre paradigme de l'infini qui renvoie aux origines de l'Univers.

La relativité générale, théorie einsteinienne de la gravitation, est bâtie sur d'autres concepts que ceux de l'attraction universelle de Newton : l'attraction devient courbure de l'espace-temps, déterminée par la présence de matière. Nous vivons dans un espace-temps non euclidien. L'influence gravitationnelle se décrit par une géométrie courbe, qui dicte les trajectoires possibles des particules matérielles et des rayons lumineux, astreints à en épouser les contours, de façon analogue à un tissu élastique creusé par des corps matériels massifs, dont la trame – les géodésiques – serait tissée par les rayons lumineux. Que se passe-t-il au voisinage d'un astre massif ? Il est naturel de penser que la géométrie correspondante est d'autant plus déformée que le corps est plus massif pour un rayon donné, c'est-à-dire plus compact. La relativité générale associe à tout corps sphérique un rayon critique tel que, si le corps est confiné dans ce rayon, son champ gravitationnel devient si intense que rien ne peut s'en échapper. La géométrie de l'espace-temps change alors de nature, devient pathologique. C'est un trou noir. Bien entendu, la grande majorité des astres sont très éloignés de cet état de trou noir ; le rayon critique du Soleil n'est que de 3 kilomètres, alors que son rayon réel est de 700 000 kilomètres ; de même, le rayon critique de la Terre est de 1 centimètre. Il faudrait d'improbables mains géantes pour comprimer la Terre aux dimensions d'une bille et la transformer en trou noir !

Toutefois, l'effondrement gravitationnel qui guette inéluctablement tous les astres massifs peut conduire à de telles concentrations de matière et à la naissance de trous noirs. Les conséquences qui en découlent sur l'espace-temps environnant sont remarquables. Certes, suffisamment loin du rayon critique, le comportement de la géométrie est normal : une particule peut soit tomber vers le centre, soit naviguer en orbite circulaire, soit s'éloigner si elle possède une énergie suffisante (pensons à une fusée, ou mieux à

un photon, particule de lumière). Mais plus on se rapproche du rayon critique, plus les particules ont tendance à tomber vers le centre. À partir du rayon critique, il n'y a plus d'échappatoire : les trajectoires sont toutes dirigées vers l'intérieur ; la fusée, même disposant d'une énergie illimitée, ne peut y échapper, pas plus que le photon.

La surface d'un trou noir, infrangible bien qu'immatérielle, constitue une limite à l'investigation. Nous l'appelons *horizon*, c'est-à-dire une frontière de l'espace-temps au-delà de laquelle nous ne pouvons rien apercevoir. Elle divise l'Univers en deux régions ; une partie externe où nous vivons et observons, une partie interne qui représente un autre univers dont nous ne pouvons recevoir aucune information (on pourrait toutefois l'explorer en participant à l'effondrement de la matière et de la géométrie, mais au prix de ne plus jamais pouvoir en ressortir pour relater nos découvertes). Ce partage cosmique a une conséquence paradoxale : du point de vue externe, un trou noir est un objet fantastiquement simple, car dépourvu d'attributs observables de l'extérieur. Cette pénurie d'informations sur la constitution d'un trou noir s'exprime par la formule pittoresque : *un trou noir n'a pas de poils*. Sous sa forme scabreuse, elle cache l'un des plus difficiles théorèmes mathématiques jamais démontrés. Elle signifie notamment que deux trous noirs de masses égales sont strictement identiques à tous points de vue, alors que la ressemblance entre deux étoiles, deux morceaux de sucre ou deux éditions des *Fleurs du mal* n'est qu'approximative. Cette simplicité est d'autant plus remarquable qu'un trou noir peut se substantier de corps très divers : étoiles, planètes, astéroïdes. Une civilisation entière pourrait s'y engloutir sans que la moindre trace subsiste, hormis sa masse brute (pour être rigoureux, le trou noir le plus général est en rotation et électrisé ; son moment de rotation et sa charge électrique constituent donc des paramètres supplémentaires). À ce titre, le trou noir engendre le processus le plus irréversible qu'il soit possible d'imaginer ; c'est le plus grand réservoir d'*entropie*.

Au trou noir passif qui distord l'espace-temps sans que rien ne l'affecte lui-même s'est substitué, à la fin des années 1970, le trou noir *dynamique*, capable de subir ou d'exercer des forces, d'absorber ou de fournir de l'énergie, bref de se transformer au cours du temps. Ce trou noir-là a jailli tout droit d'un rêve du XIX^e siècle, celui des bâtisseurs de moteurs perpétuels : nourrir le fonctionnement d'une machine par ses propres déchets. Des calculs compliqués ont en effet montré qu'un projectile à la trajectoire bien calculée pourrait se disloquer de telle sorte qu'une partie soit capturée par le trou noir mais qu'une autre revienne à l'envoyeur avec une énergie plus grande, le gain provenant de l'énergie rotationnelle du trou noir. Pourquoi dès lors ne pas imaginer des cités industrielles du futur bâties autour des trous noirs

pour en extraire pendant des millénaires la fabuleuse énergie latente ? Frappante illustration d'une physique des plus spéculatives qui ne se contente pas d'explorer, mais prétend aussi exploiter !

La mécanique quantique a fait ensuite une entrée fracassante dans la théorie des trous noirs. Dans la conception classique du trou noir, rien ne peut sortir de sa surface, l'horizon. Mais on sait qu'à l'échelle des processus microscopiques, gouvernés par les lois de la mécanique quantique, aucune particule n'est définitivement prisonnière d'un mur, aussi haut soit-il. Le principe d'incertitude appliqué à la théorie des trous noirs microscopiques crée des « tunnels » quantiques à travers l'horizon gravitationnellement infranchissable, permettant ainsi aux trous noirs de *s'évaporer*. Voici alors la faune des trous noirs quantiques, formés non par effondrement gravitationnel d'astres massifs mais lors des tout premiers instants de l'Univers, par condensation brutale de grumeaux dans la pâte primordiale : mini-trous noirs d'une tonne qui s'évaporent en dix milliardièmes de seconde, trous noirs de la masse d'une montagne mais de la taille d'un proton qui pourraient survivre quinze milliards d'années – l'âge estimé de notre univers –, trous noirs galactiques qui vivront des éons...

Le trou noir-microcosme ou monde intérieur n'est pas sans rappeler la pupille (le trou noir de l'œil), qui reçoit les rayons lumineux d'une infinité de sources lumineuses de l'Univers. Il évoque aussi la cavité à rayonnement : si l'on creuse un petit trou dans la paroi d'une enceinte, le rayonnement qui pénètre par le trou est emprisonné dans l'enceinte et a peu de chances de s'échapper avant d'être absorbé. Le trou se comporte donc comme un parfait absorbeur de radiation, et réciproquement comme un parfait émetteur de rayonnement. L'un des résultats les plus étonnants de la théorie des trous noirs est que leur évaporation se manifeste sous forme d'un rayonnement de corps noir, dont la température est fixée par l'accélération de la pesanteur à l'horizon. Autrement dit, le trou noir, four idéal, n'est pas vraiment un trou, puisque du rayonnement en sort, mais il est bien noir !

Il n'y a rien de véritablement paradoxal dans ces propriétés étranges des trous noirs. Ce n'est que lorsqu'on extrapole le destin de la matière en effondrement au-delà de l'horizon que la situation devient embarrassante, avec l'apparition de *singularités*, c'est-à-dire d'infinis de courbure. La singularité annule toute possibilité de mesure ou de loi. Un autre avatar pénible de la théorie vient du penchant naturel de l'esprit humain pour la symétrie, qui a conduit à l'invention des trous blancs, jaillissements gravitationnels expulsant la matière comme les trous noirs l'engloutissent. On fait alors face à un autre problème : si l'on conçoit le processus physique qui, de l'effondrement

gravitationnel d'une étoile mènerait à un trou noir, on est soudain confronté à une créature mathématique génitrice d'un univers inouï qui pourrait n'être qu'un feuillet d'un univers unique connecté à notre propre feuillet par des trous de ver unissant trous noirs et trous blancs. Les physiciens tentent de se rassurer en travaillant fébrilement à une théorie encore balbutiante, la gravitation quantique, dont la moindre des vertus serait l'élimination pure et simple des infinis gravitationnels. Ceux-ci seraient remplacés par des fluctuations quantiques de l'espace-temps, qui ne donneraient pas lieu à des infinis mais auraient pour effet de boucher les trous de ver et autres pathologies cosmiques. Ce n'est qu'à ce prix que le « bon sens » physique sera sauvé. Mais j'ai envie de dire : « Méfions-nous du bon sens ! »

Si le trou noir apparaît comme une solution possible aux équations du champ gravitationnel, sa définition ne garantit nullement son existence réelle. Les astrophysiciens en sont venus toutefois à accepter l'idée du trou noir comme issue possible de la vie d'une étoile ; par exemple, pour qu'un trou noir de la masse d'une étoile ait pu se former, il faut qu'une étoile, lors d'une explosion de supernova marquant la fin de sa vie thermonucléaire, ait subi un effondrement retenant plus de trois masses solaires.

Alors, tandis que les étoiles brûlent, les astronomes d'aujourd'hui scrutent le ciel à la recherche de ces invisibles trous noirs dont la quête s'apparente à la reconstitution d'un puzzle à partir de pièces rares. Les arguments indiquant la présence possible d'un trou noir tiennent de l'enquête policière et mobilisent l'extrême diversité des astres observables et des techniques.

Le seul espoir de reconnaître la trace des trous noirs, puisqu'ils n'émettent aucun rayonnement, consiste à déceler sur d'autres corps astronomiques l'effet de leur intense emprise gravitationnelle. On sait par exemple que la vitesse moyenne des étoiles dans la région centrale d'une galaxie est liée à la masse présente dans cette région. En mesurant cette vitesse dans nombre de galaxies, y compris les plus familières (la nôtre ou la galaxie jumelle d'Andromède), les astronomes concluent le plus souvent à la présence de masses énormes (plusieurs millions de fois celle du Soleil) dans un volume très restreint. Des trous noirs encore plus gigantesques pourraient exister dans les noyaux actifs de galaxies, vaste famille d'astres dont les plus connus sont les quasars. Ils ont en commun la propriété d'émettre d'énormes quantités d'énergie dans un volume réduit, chose que seul un trou noir, dans l'état actuel de nos connaissances, est capable de produire (l'émission d'énergie ne proviendrait pas du trou noir lui-même mais de la matière qui y tomberait : gaz, étoiles déchiquetées ou avalées tout entières).

Enfin, des trous noirs plus proches, et de taille plus modeste car formés lors d'explosions de supernovæ, pourraient résider dans notre propre galaxie. Cette conviction provient de l'étude d'astres particuliers émetteurs de rayonnement X, interprétés comme des paires d'étoiles dont l'une est très compacte : naine blanche, étoile à neutrons ou trou noir. Plusieurs cas ont été découverts où l'analyse dévoile une masse supérieure au seuil fatidique de 3 masses solaires. Or, parmi les étoiles compactes, seul le trou noir peut posséder une telle masse. C'est ainsi que les trous noirs certifiés de notre galaxie portent aujourd'hui les noms étranges de Cygnus X-1, LMC X-3 ou, pire encore, A 0620-00.

La puissance fascinatrice qu'exercent les trous noirs – tant chez les spécialistes que dans le plus large public – est un cas unique en physique fondamentale, sans doute lié à l'idée très anthropomorphe d'un destin invisible où s'effondre toute existence, un voyage sans retour vers un gouffre indicible où toute identité se perd.

1 - In *Mélanges offerts à Gérard Oberlé pour ses 25 ans de librairie, 1967-1992*.

Les crêpes stellaires¹

L'influence gravitationnelle que la Lune exerce sur la Terre se traduit notamment par des forces de marée qui perturbent l'équilibre du fluide océanique. Or les océans de notre globe ne sont pas les seules victimes des effets de marée. Ceux-ci se manifestent un peu partout dans l'Univers et à différentes échelles dès lors que deux ou plusieurs corps célestes passent à proximité les uns des autres. Que se passerait-il, par exemple, si notre Soleil frôlait la surface d'un gigantesque trou noir dont le champ gravitationnel est si intense ? Un tel accident semble sortir tout droit d'un scénario de film-catastrophe. Pourtant, de tels événements se produisent peut-être fréquemment dans les noyaux de certaines galaxies où gravitent des millions d'étoiles semblables à notre Soleil et au sein desquels les astrophysiciens soupçonnent la présence de trous noirs géants. Aussi, Brandon Carter et moi-même nous sommes penchés sur la question et avons développé un modèle dont certaines implications inattendues pourraient conduire à une révision de quelques idées communément admises.

Des galaxies ayant un petit moteur à l'emplacement du cœur

Certaines galaxies possèdent un noyau central très compact responsable d'une fraction plus ou moins importante de l'énergie émise par la galaxie tout entière ; on les appelle « galaxies à noyau actif ». Les galaxies de Seyfert, les galaxies N et les Lacertides ont des noyaux actifs dont la luminosité fabuleuse s'échelonne entre 10^{44} et 10^{46} erg/s, c'est-à-dire entre une et cent fois la luminosité totale émise par les quelques centaines de milliards d'étoiles d'une galaxie géante comme M. 31. Encore cent fois plus lumineux, les quasars sont des galaxies extrêmement lointaines dont le noyau est si éblouissant qu'il gomme littéralement l'émission des autres régions, donnant aux quasars l'apparence ponctuelle « quasi stellaire » qui a permis de les baptiser. Il est assez bien établi que la source d'énergie d'un noyau actif est confinée à l'intérieur d'un volume extrêmement réduit, guère

plus grand que celui du système solaire. Quel est donc l'extraordinaire moteur caché au centre même des galaxies à noyau actif, capable de produire mille fois plus d'énergie qu'une galaxie ordinaire tout en ne disposant que d'un volume plusieurs milliards de fois plus faible ?

La théorie de la relativité générale et des champs gravitationnels forts apporte quelques éléments de réponse. En vertu de la relation d'Einstein $E = mc^2$, pour produire une énergie comprise entre 10^{44} et 10^{48} erg/s il faut au minimum une masse comprise entre quelques millions et quelques milliards de masses solaires. Une telle masse concentrée dans un volume aussi restreint produit un champ gravitationnel intense, et la source d'énergie des noyaux actifs ne serait autre que l'énergie gravitationnelle libérée par toute la matière tombant en chute libre sur un corps central supermassif.

Des trous noirs géants au cœur des galaxies

L'hypothèse la plus simple envisagée par les astrophysiciens est donc l'existence au sein des noyaux actifs d'un trou noir géant de 10^6 à 10^9 masses solaires, attirant à lui de grandes quantités de gaz ; en tombant, le gaz s'échaufferait et produirait le rayonnement observé. Pour que le moteur trou noir fonctionne au régime noyau actif, il doit consommer chaque année au moins une masse solaire de gaz. Il semblerait que ce soient les étoiles situées dans l'environnement immédiat du trou noir qui lui fournissent le carburant, et cela par deux mécanismes possibles : les collisions et les effets de marée.

Si deux étoiles entrent en collision mutuelle (la densité stellaire très élevée des noyaux de galaxies augmente considérablement la probabilité de telles rencontres) avec une vitesse plus grande que 500 km/s (ce qui sera le cas au voisinage d'un trou noir massif accélérant notablement les étoiles sur leur orbite), elles se brisent et libèrent leur matériau gazeux sous forme de nuages ou de filaments susceptibles d'être ultérieurement absorbés par le trou noir. Si d'autre part une étoile s'approche très près de la surface du trou noir, où le champ gravitationnel varie abruptement, la force s'exerçant sur la partie de l'étoile la plus proche du trou noir peut dépasser de beaucoup celle s'exerçant sur la partie opposée, jusqu'à ce que la force différentielle, dite *force de marée*, finisse par dominer la force de cohésion interne de l'étoile et provoquer ainsi sa rupture. Ce phénomène spectaculaire ne peut se produire que si l'étoile pénètre à l'intérieur d'une sphère critique autour du trou noir, appelée *sphère de Roche*, du nom d'un mathématicien de l'université de Montpellier qui, dès 1847, avait étudié le problème des marées dans le contexte planète-satellite. Le rayon de la sphère de Roche dépend notamment de la masse du trou noir. J. G. Hills a fait justement remarquer que

pour les trous noirs plus massifs que 3×10^8 masses solaires, le rayon propre du trou noir (qui dépend aussi de sa masse) devient plus grand que son rayon de Roche. Par conséquent, le mécanisme de rupture d'étoiles par les forces de marée d'un trou noir ne peut être efficace que si le trou noir n'est pas trop géant, en tout cas moins massif que la limite de Hills : au-delà, les étoiles seraient d'abord avalées par le trou noir avant d'être brisées, ce qui, compte tenu des propriétés très particulières des trous noirs, serait d'une totale inefficacité pour libérer de l'énergie.

Le scénario actuellement en faveur pour expliquer les noyaux actifs de galaxies est donc le suivant : pour les galaxies de Seyfert et les noyaux peu actifs, le trou noir central aurait une masse comprise entre 10^5 et 10^8 masses solaires, l'approvisionnement en gaz étant dû principalement aux effets de marée ; pour les quasars et les noyaux les plus énergétiques, le trou noir aurait une masse supérieure à la limite de Hills et les collisions stellaires fourniraient tout le carburant.

Des étoiles déformées par de gigantesques forces de marée

Le modèle de déformation et de rupture d'une étoile par effet de marée était resté jusqu'à aujourd'hui très sommaire. Il était en fait calqué sur celui de Roche (amélioré par Jeans en 1917) et s'appliquait très bien au cas de satellites naturels, solides ou liquides, en orbite quasi circulaire autour de planètes. On sait, par exemple, qu'un corps soumis aux forces de marée d'une source gravitationnelle voisine a tendance à s'allonger en direction de la source et à se comprimer dans les directions perpendiculaires ; c'est la raison pour laquelle le niveau des océans terrestres monte non seulement là où l'attraction lunaire est la plus forte, mais aussi au point diamétralement opposé. Si les forces de marée deviennent grandes (comme, par exemple, dans certains systèmes d'étoiles doubles très serrés), le corps qui leur est soumis peut s'allonger considérablement et prendre l'allure d'un « cigare » ; dans le cas extrême, précisément à l'intérieur de la sphère de Roche, le cigare devient si allongé que le corps ne peut plus rester stable et commence à se désagréger.

Ce qui est valide pour un système planète-satellite ne l'est pas forcément pour un système trou noir-étoile. Brandon Carter, de l'Observatoire de Meudon, et moi-même avons réexaminé la question et développé un nouveau modèle mieux approprié à la description des effets de marée qu'un trou noir géant peut exercer sur une étoile ordinaire. Par rapport aux systèmes planète-satellite, les systèmes trou noir-étoile font apparaître deux caractéristiques nouvelles qui, dans certains cas, peuvent transformer complètement le scénario de rupture

jusqu'ici admis. Tout d'abord, l'orbite d'une étoile autour d'un trou noir n'a aucune raison d'être quasi circulaire dans le modèle « cométaire » de noyau de galaxie, où les étoiles constituent un réservoir lointain dont s'échappe de temps en temps un membre, par le biais des perturbations mutuelles. Celui-ci tombe alors en chute libre sur le trou noir central. Aussi, les orbites stellaires passant à proximité de ce trou noir et sur lesquelles des effets de marée importants pourront s'exercer, ont-elles de grandes chances d'être très excentriques. Elles pourront donc non seulement pénétrer à l'intérieur de la sphère de Roche, mais y pénétrer *profondément*. Or les forces de marée varient comme l'inverse du cube de la distance au trou noir. Par conséquent, à la distance $R_R/10$, R_R étant le rayon de la sphère de Roche, les forces de marée sont mille fois plus grandes qu'à la distance R_R . Aussi, la fraction non négligeable (10 %) d'étoiles parvenant à cette distance aura des chances de subir un sort quelque peu différent de celui des étoiles frôlant à peine la sphère de Roche. La seconde caractéristique nouvelle de notre modèle tient à la nature même des corps soumis aux effets de marée. Une étoile, contrairement à un satellite, est gazeuse, donc très compressible (le défaut majeur du modèle traditionnel était de considérer une étoile comme une sphère liquide incompressible). Notre modèle prédit ainsi qu'une étoile pénétrant dans la sphère de Roche d'un trou noir est initialement étirée sous forme de cigare, mais qu'ultérieurement, à mesure que les forces de marée augmentent, elle est fortement comprimée dans la direction perpendiculaire au plan de son orbite, prenant transitoirement l'allure d'une « crêpe » : c'est l'effet « laminoir », dû à la fois à la brusque variation des forces de marée sur les orbites qui pénètrent profondément à l'intérieur du rayon de Roche, et à la compressibilité du matériau stellaire.

Or qui dit compression dit échauffement de l'étoile. Un fait très significatif est la forte dépendance de ces deux quantités par rapport au facteur de pénétration (paramètre caractéristique qui mesure le rapport entre le rayon de Roche et la distance de plus courte approche de l'étoile au trou noir) : la densité augmente comme le cube du facteur de pénétration, l'échauffement maximum varie comme le carré du même facteur et ce pendant un temps inversement proportionnel à la puissance quatrième de ce même facteur. Ainsi nous avons calculé que pour une étoile frôlant la sphère de Roche, il se passera à peu près la même chose que s'il s'agissait d'une gigantesque boule liquide, alors qu'une étoile qui y pénètre d'un facteur dix sera comprimée d'un facteur mille et chauffée d'un facteur cent pendant un dixième de seconde ! Les crêpes stellaires sont donc ultrachaudes et denses.

Comment faire sauter les crêpes stellaires ?

Les nombreuses conséquences de notre modèle commencent à peine d'être explorées. Le phénomène nouveau le plus spectaculaire semble être la possibilité de déclenchement d'une explosion thermonucléaire de l'étoile. En effet, les taux de réactions nucléaires régissant l'équilibre d'une étoile dépendent fortement de sa densité et de sa température centrales. Pour une étoile de type solaire, la densité centrale est 100 g/cm^3 et la température vingt millions de degrés. Dans ces conditions « normales », la réaction nucléaire dominante est la fusion de quatre atomes d'hydrogène en un atome d'hélium, soit par une chaîne « proton-proton », soit par une chaîne plus complexe, dite cycle CNO, dans laquelle des éléments plus lourds tels que le carbone, l'azote et l'oxygène jouent le rôle de catalyseurs. Ces cycles sont néanmoins très lents : dans le Soleil, un atome d'hydrogène survit en moyenne quelques centaines de millions d'années avant d'être brûlé en hélium (ce qui explique la longue durée de vie et la stabilité de ce type d'étoiles).

Si maintenant l'étoile pénètre d'un facteur dix dans la sphère de Roche d'un trou noir géant, sa température centrale augmente et reste à sa valeur maximale, un milliard de degrés, pendant un dixième de seconde. Le calcul détaillé de toutes les nouvelles réactions nucléaires pouvant alors entrer en jeu est très compliqué, mais on peut facilement en avoir une idée d'ensemble. Les chaînes de réactions sont considérablement accélérées ; néanmoins, les diverses réactions de fusion de l'hydrogène font intervenir des désintégrations de noyaux intermédiaires radioactifs, dont la durée de vie est, elle, indépendante de la température : un cycle CNO ne peut, par exemple, pas être « bouclé » plus vite qu'en une centaine de secondes, temps de désintégration de l'oxygène en azote. Le chauffage d'une étoile à 10^9 K pendant un dixième de seconde est donc beaucoup trop bref pour brûler efficacement l'hydrogène. En revanche, l'hélium brûle de plus en plus vite à mesure que la température augmente, le résultat de cette combustion étant le carbone. Alors que dans des conditions normales cette réaction (appelée triple-alpha car elle fait intervenir trois noyaux d'hélium alpha) est beaucoup trop lente, à un milliard de degrés et si la densité est suffisante, elle est plus courte que 0,1 seconde. Nous avons découvert que les petites étoiles de masse inférieure à un dixième de masse solaire (qui pourraient exister en grand nombre dans les noyaux de galaxies) peuvent subir, si leur facteur de pénétration dans la sphère de Roche est suffisamment grand, une combustion instantanée de leur hélium au moment même où elles sont écrasées sous forme de crêpe ultrachaud par les forces de marée du trou noir.

Les conséquences énergétiques de cette combustion de l'hélium sont importantes. En effet, alors que dans le scénario traditionnel le

calcul montre que les débris stellaires restent en orbite autour du trou noir (et peuvent par conséquent l'alimenter en gaz), dans notre modèle de rupture thermo-nucléaire les débris sont éjectés avec cent fois plus d'énergie et sont soufflés loin du trou noir ; tout le schéma ultérieur d'absorption du gaz par le trou noir, considéré comme la source principale du rayonnement des noyaux actifs, pourrait être donc remis en question. Notre modèle a toutefois ses limites.

Des crêpes trop inhibées pour sauter

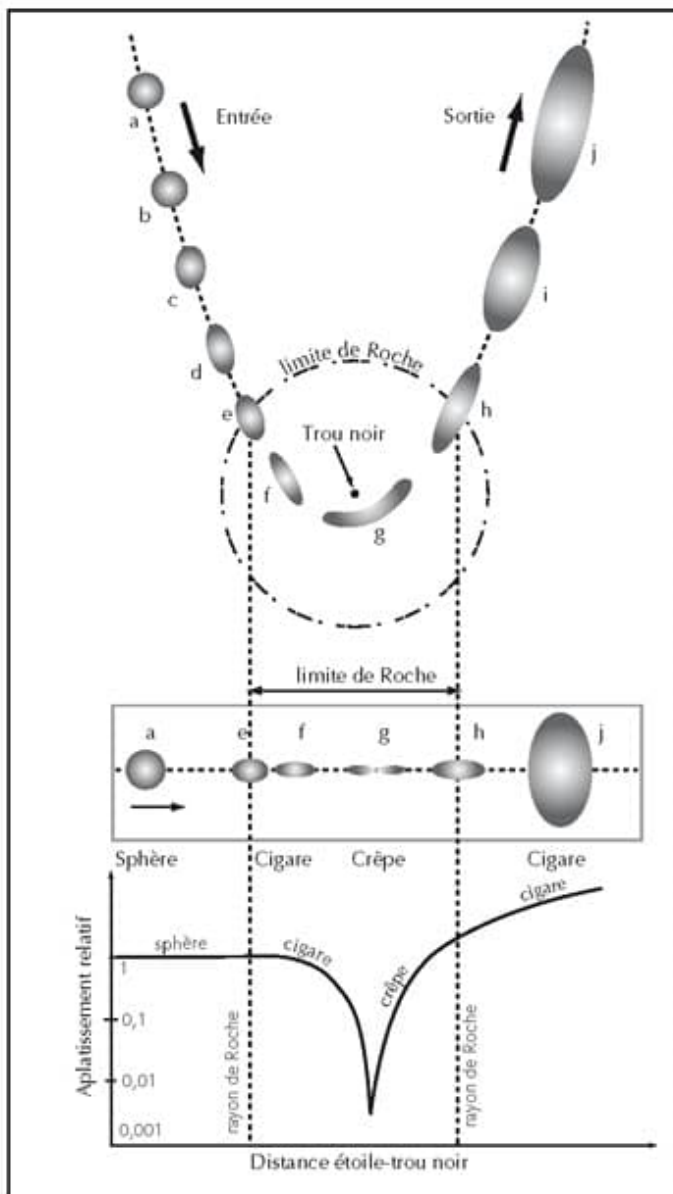
Une première restriction de notre théorie réside dans la rareté des événements explosifs : sur le nombre déjà restreint d'étoiles parvenant dans la sphère de Roche d'un trou noir, seule une fraction de 10 % y pénétrera d'un facteur suffisamment grand pour être chauffée d'un facteur cent, et seule une fraction d'entre elles, de masse assez petite, pourra donner lieu à la détonation de l'hélium. Cependant, les effets de marée ne sont pas le seul moyen de fabriquer des crêpes stellaires. Les collisions d'étoiles de plein fouet et à grande vitesse susceptibles de se produire au voisinage d'un trou noir supermassif (disons à plus de 5 000 km/s) forment également ce type de configuration transitoire, accompagné des mêmes effets de compression et d'échauffement. Les crêpes stellaires pourraient par conséquent jouer un rôle important aussi bien dans les noyaux de galaxies ordinaires (si le trou noir est peu massif) que dans les noyaux actifs (si le trou noir est plus massif) et dans les quasars (au-dessus de la limite de Hills, les collisions entrant en jeu).

Une deuxième restriction, plus sérieuse, est que notre modèle suppose en première approximation que les déformations de l'étoile soient linéaires ; si cette hypothèse est parfaitement justifiée pour les déformations de faible amplitude, il se pourrait que dans le cas de forts facteurs de pénétration, le développement d'ondes de choc au cœur de l'étoile comprimée empêche la formation d'une crêpe aussi dense que dans le modèle linéaire, auquel cas la fusion thermonucléaire de l'hélium pourrait être inhibée².

Malgré ces restrictions, deux développements de notre modèle de crêpes stellaires, l'un théorique, l'autre observationnel, sont également prometteurs. Le premier concerne la possibilité que le « flash » thermonucléaire de l'hélium, lorsqu'il se produit, serve d'amorce à la combustion totale de l'hydrogène par un cycle CNO accéléré ; dans ces conditions, l'étoile, après être ressortie de la sphère de Roche, continuerait à brûler tout en se dilatant, libérant encore plus d'énergie et éjectant son gaz à des vitesses de plusieurs milliers de km/s.

Quant au développement observationnel, il s'agirait d'un test possible de notre modèle par le biais de l'astronomie gamma. On

pense actuellement que la plupart des éléments plus lourds que l'hélium existant dans l'Univers sont synthétisés dans les creusets stellaires au cours de phénomènes de type nova ou supernova, où l'étoile passe par des phases de très haute température. Certains de ces éléments sont radioactifs et se désintègrent en émettant un rayonnement gamma caractéristique. Les crêpes stellaires ressemblent à bien des égards aux supernovæ « de type I ». Dans ces dernières, la nucléosynthèse explosive aboutit à la formation de nickel, dont la désintégration se fait en deux étapes : d'abord le cobalt, radioactif, puis le fer, stable. Les modèles de supernova imposent que seul le rayonnement gamma caractéristique de la deuxième étape cobalt-fer soit observable, les photons gamma produits par la désintégration du nickel en cobalt restant piégés à l'intérieur de l'étoile. En revanche, les modèles de crêpes stellaires admettent la possibilité que ces derniers puissent échapper à l'étoile et parvenir à un détecteur. De telles observations constitueraient donc une véritable signature de nos modèles. Pour en savoir davantage, il faudra patienter jusqu'en 1985, date du lancement du Gamma Ray Observatory Satellite, dont le détecteur sera sensible à des signaux jusqu'à présent trop faibles pour être mesurables³.



Lorsqu'une étoile arrive à proximité d'un trou noir, elle subit de gigantesques forces de marée, se voit de ce fait déformée, et prend l'espace de quelques secondes l'allure d'une crêpe. Ce phénomène spectaculaire ne peut se produire que si l'étoile pénètre à l'intérieur d'une sphère critique autour du trou noir, la sphère de Roche. Le dessin illustre la déformation d'une étoile par effet de marée, le long d'une orbite à grand facteur de pénétration dans la sphère de Roche d'un trou noir (la taille relative de l'étoile est considérablement exagérée pour la clarté du dessin). La figure du haut représente la déformation de l'étoile dans son plan orbital (vue du dessus), celle du bas, la déformation (relative) dans la direction perpendiculaire. Les effets nouveaux prédits par notre modèle et dus à l'extrême compressibilité de l'étoile apparaissent clairement sur la figure du bas.

De (a) jusqu'en (d), l'étoile est encore loin du trou noir, les forces de marée sont très faibles et l'étoile reste à peu près sphérique.

En (e), l'étoile pénètre dans la sphère de Roche ; on peut d'ores et déjà prédire qu'elle sera ultérieurement brisée ; pour l'instant, sa configuration se rapproche plutôt de celle d'un cigare.

De (f) à (g), l'effet laminoir entre en jeu : le cigare s'étire et l'étoile est littéralement écrasée (d'un facteur mille) dans le plan de son orbite.

En (g), peu après le passage au périastre de l'orbite, la compression est maximale et l'étoile est complètement aplatie sous forme de crêpe. Puis elle se dilate en ressortant de la sphère de Roche en (h), retrouvant une allure de cigare. Beaucoup plus loin sur son orbite, l'étoile finira par se dissocier complètement et laisser son gaz sur place, du moins dans le cas où les réactions thermonucléaires ne se déclenchent pas en (g). Sinon, l'étoile se regonflerait plus rapidement sous l'effet de l'explosion et la partie droite du dessin devrait être modifiée.

1- Article paru en 1983 dans la revue *La Recherche* (n° 143).

2- Des calculs hydrodynamiques complexes effectués en 2007 par l'auteur et un collaborateur montrent que les ondes de choc ne se développent qu'après la phase de compression, et n'inhibent donc pas la formation de crêpes ultrachaudes et denses. En revanche, la fusion thermonucléaire de l'hélium ne peut se produire que pour des naines blanches écrasées par les forces de marée de trous noirs de 10 000 masses solaires [*Note ajoutée pour la présente édition*].

3- Depuis cet article, plusieurs groupes de par le monde ont étudié les réactions thermonucléaires susceptibles de se déclencher dans les crêpes stellaires. Le scénario envisagé aujourd'hui diffère de celui avancé dans l'article. En outre, l'auteur a suggéré que les ondes de choc pouvaient engendrer un pic de température responsable de sursauts X et gamma de haute énergie, détectables par les télescopes spatiaux dédiés à ces domaines de longueur d'onde [*Note ajoutée pour la présente édition*].

Trous noirs et distorsions spatio-temporelles¹

Les trous noirs sont des astres invisibles

Le concept d'astre invisible a été imaginé par deux astronomes de la fin du XVIII^e siècle, John Michell (1783) et Pierre Simon de Laplace (1796). Dans le cadre de la théorie de l'attraction universelle élaborée par Newton, ils s'étaient interrogés sur la possibilité qu'il puisse exister dans l'Univers des astres si massifs que la vitesse de libération à leur surface puisse dépasser la vitesse de la lumière. La vitesse de libération est la vitesse minimale avec laquelle il faut lancer un objet pour qu'il puisse échapper définitivement à l'attraction gravitationnelle d'un astre. Si elle dépasse la vitesse de la lumière, l'astre est nécessairement invisible, puisque même les rayons lumineux resteraient prisonniers de son champ de gravité.

Michell et Laplace avaient donc décrit le prototype de ce qu'on appellerait beaucoup plus tard (en 1968) un « trou noir », dans le cadre d'une autre théorie de la gravitation (la relativité générale). Ils avaient cependant calculé les bons « ordres de grandeur » caractérisant l'état de trou noir. Un astre ayant la densité moyenne de l'eau (1 g/cm^3) et une masse de dix millions de fois celle du Soleil serait invisible. De tels corps sont aujourd'hui nommés « trous noirs supermassifs ». Les astronomes soupçonnent leur existence au centre de pratiquement toutes les galaxies (bien qu'ils ne soient pas constitués d'eau !). Plus communs encore seraient les « trous noirs stellaires », dont la masse est de l'ordre de quelques masses solaires et le rayon critique (dit rayon de Schwarzschild) d'une dizaine de kilomètres seulement. Pour transformer le Soleil en trou noir, il faudrait le réduire à une boule de 3 kilomètres de rayon ; quant à la Terre, il faudrait la compacter en une bille de 1 centimètre !

Les trous noirs sont des objets relativistes

La théorie des trous noirs ne s'est véritablement développée qu'au XX^e siècle dans le cadre de la relativité générale. Selon la conception

einsteinienne, l'espace, le temps et la matière sont couplés en une structure géométrique non euclidienne compliquée. En termes simples, la matière-énergie confère, localement du moins, une forme à l'espace-temps. Ce dernier peut être vu comme une nouvelle entité qui est à la fois « élastique », en ce sens que les corps massifs engendrent localement de la courbure, et « dynamique », c'est-à-dire que cette structure évolue au cours du temps, au gré des mouvements des corps massifs. Par exemple, tout corps massif engendre autour de lui, dans le tissu élastique de l'espace-temps, une courbure ; si le corps se déplace, la courbure se déplace avec lui et fait vibrer l'espace-temps sous forme d'ondulations appelées ondes gravitationnelles.

La courbure de l'espace-temps peut se visualiser par les trajectoires des rayons lumineux et des particules « libres ». Celles-ci épousent naturellement la forme incurvée de l'espace. Par exemple, si les planètes tournent autour du Soleil, ce n'est pas parce qu'elles sont soumises à une force d'attraction universelle, comme le voulait la physique newtonienne, mais parce qu'elles suivent la « pente naturelle » de l'espace-temps qui est courbé au voisinage du Soleil. En relativité, la gravité n'est pas une force, c'est une manifestation de la courbure de l'espace-temps. C'est donc elle qui sculpte la *forme locale* de l'Univers.

Les équations d'Einstein indiquent comment le degré de courbure de l'espace-temps dépend de la concentration de matière (au sens large du terme, c'est-à-dire incluant toutes les formes d'énergie). Les trous noirs sont la conséquence logique de ce couplage entre matière et géométrie. Ils rassemblent tellement d'énergie dans une région confinée de l'Univers qu'ils creusent un véritable « puits » dans le tissu élastique de l'espace-temps. Toute particule, tout rayon lumineux pénétrant dans une zone critique définie par le bord (immatériel) du puits, sont irrémédiablement capturés.

Comment les trous noirs peuvent-ils se former ?

Les modèles d'évolution stellaire, développés tout au long du XX^e siècle, conduisent à un schéma général de l'évolution des étoiles en fonction de leur masse. Le destin final d'une étoile est toujours l'effondrement gravitationnel de son cœur (conduisant à un « cadavre stellaire »), accompagné de l'expulsion de ses couches externes. Il y a trois types de cadavres stellaires possibles :

- La plupart des étoiles (90 %) finissent en « naines blanches », des corps de la taille de la Terre mais un million de fois plus denses, constituées essentiellement de carbone dégénéré. Ce sera le cas du Soleil.
- Les étoiles dix fois plus massives que le Soleil (9,9 %) explosent

en supernova. Leur cœur se contracte en une boule de 15 kilomètres de rayon, une « étoile à neutrons » à la densité fabuleuse. Elles sont détectables sous la forme de pulsars, objets fortement magnétisés et en rotation rapide dont la luminosité radio varie périodiquement.

- Enfin, si l'étoile est initialement trente fois plus massive que le Soleil, son noyau est condamné à s'effondrer sans limite pour former un trou noir. On sait en effet qu'une étoile à neutrons ne peut pas dépasser une masse critique d'environ 3 masses solaires. Les étoiles très massives sont extrêmement rares : une sur mille en moyenne. Comme notre galaxie abrite environ cent milliards d'étoiles, on peut s'attendre à ce qu'elle forme une dizaine de millions de trous noirs stellaires.

Quant aux trous noirs supermassifs, ils peuvent résulter, soit de l'effondrement gravitationnel d'un amas d'étoiles tout entier, soit de la croissance d'un trou noir « germe » de masse initialement modeste.

Comment détecter les trous noirs ?

Certains trous noirs peuvent être détectés indirectement s'ils ne sont pas isolés, et s'ils absorbent de la matière en quantité suffisante. Par exemple, un trou noir faisant partie d'un couple stellaire aspire l'enveloppe gazeuse de son étoile compagne. Avant de disparaître, le gaz est chauffé violemment, et il émet une luminosité caractéristique dans la gamme des rayonnements à haute énergie. Des télescopes à rayons X embarqués sur satellite recherchent de tels trous noirs stellaires dans les systèmes d'étoiles doubles à luminosité X fortement variable. Il existe dans notre seule galaxie une douzaine de tels « candidats » trous noirs.

L'observation astronomique nous indique aussi que les trous noirs supermassifs existent vraisemblablement au centre de nombreuses galaxies – dont la nôtre. Le modèle du « trou noir galactique » explique en particulier la luminosité extraordinaire qui est libérée par les galaxies dites « à noyau actif », dont les plus spectaculaires sont les quasars, objets intrinsèquement si lumineux qu'ils permettent de sonder les confins de l'espace.

En 1979, mon premier travail de recherche a consisté à reconstituer numériquement l'apparence d'un trou noir entouré d'un disque de gaz chaud. Les distorsions de l'espace-temps au voisinage du trou noir sont si grandes que les rayons lumineux épousent des trajectoires fortement incurvées permettant, par exemple, d'observer simultanément le dessus et le dessous du disque (voir plus bas). J'ai ensuite étudié la façon dont une étoile qui frôle un trou noir géant est brisée par les forces de marée. L'étirement de l'espace est tel que, en quelques secondes, l'étoile est violemment aplatie sous la forme d'une

« crêpe flambée ». Les débris de l'étoile peuvent ensuite alimenter une structure gazeuse autour du trou noir et libérer de l'énergie sur le long terme. Ce phénomène de crêpe stellaire, mis en évidence par les calculs numériques, a finalement été observé pour la première fois plus de vingt ans après, en 2004, grâce aux satellites à rayons X Chandra et XMM-Newton.

La physique externe des trous noirs

La théorie des trous noirs s'est essentiellement développée dans les années 1960-1970. Le trou noir, comme tous les objets, tourne sur lui-même. On peut l'envisager comme un « maelström cosmique » qui entraîne l'espace-temps dans sa rotation. Comme dans un tourbillon marin, si un vaisseau spatial s'approche trop près, il commence par être irrésistiblement entraîné dans le sens de rotation et, s'il franchit une zone critique de non-retour, il tombe inéluctablement au fond du vortex.

Le temps est également distordu dans les parages du trou noir. Le temps « apparent », mesuré par toute horloge extérieure, se ralentit indéfiniment, tandis que le temps « propre », mesuré par une horloge en chute libre, n'égère que quelques secondes avant d'être anéanti au fond du trou. Si un astronaute était filmé dans sa chute vers un trou noir, personne ne le verrait jamais atteindre la surface ; les images se figeraient à jamais à l'instant où l'astronaute semblerait atteindre la frontière du trou noir. Or, selon sa propre montre, l'astronaute serait bel et bien avalé par le trou en quelques instants.

Le théorème capital sur la physique des trous noirs se formule de façon pittoresque : « Un trou noir n'a pas de poils. » Il signifie que, lorsque de la matière-énergie disparaît à l'intérieur d'un trou noir, toutes les propriétés de la matière telles que couleur, forme, constitution, etc., s'évanouissent, seules subsistent trois caractéristiques : la masse, le moment angulaire et la charge électrique. Le trou noir à l'équilibre est donc l'objet le plus « simple » de toute la physique, car il est entièrement déterminé par la donnée de ces trois paramètres. Du coup, toutes les solutions exactes de la théorie de la relativité générale décrivant la structure de l'espace-temps engendré par un trou noir sont connues et étudiées intensivement.

Par sa nature même, un trou noir est inéluctablement voué à grandir. Cependant, la théorie a connu un rebondissement intéressant au début des années 1980, lorsque Stephen Hawking a découvert que les trous noirs « microscopiques » (hypothétiquement formés lors du Big Bang) se comporteraient à l'inverse des gros trous noirs. Régis par la physique quantique et non plus seulement par la physique

gravitationnelle, ces micro-trous noirs ayant la taille d'une particule élémentaire mais la masse d'une montagne s'évaporerait car ils seraient fondamentalement instables. Ce phénomène d'« évaporation quantique » suscite encore beaucoup d'interrogations. Aucun micro-trou noir n'a été détecté, mais leur étude théorique permet de tisser des liens entre la gravité et la physique quantique. Des modèles récents suggèrent que le résultat de l'évaporation d'un trou noir ne serait pas une singularité ponctuelle « nue », mais une corde – objet théorique déjà invoqué par des théories d'unification des interactions fondamentales.

L'intérieur des trous noirs

Le puits creusé par le trou noir dans le tissu élastique de l'espace-temps est-il « pincé » par un nœud de courbure infinie – auquel cas toute la matière qui tomberait dans le trou noir se tasserait indéfiniment dans une *singularité* ? Ou bien le fond du trou noir est-il « ouvert » vers d'autres régions de l'espace-temps par des sortes de tunnels ? Cette deuxième possibilité, apparemment extravagante, est suggérée par certaines solutions mathématiques de la relativité. Un *trou de ver* serait une structure topologique exotique ressemblant à une « poignée d'espace-temps » qui relierait deux régions de l'Univers, dont l'une serait un trou noir et l'autre un « trou blanc ». Ces raccourcis d'espace-temps, qui permettraient de parcourir en quelques fractions de seconde des millions d'années-lumière sans jamais dépasser la vitesse de la lumière, ont fasciné les physiciens tout autant que les écrivains de science-fiction. Des études plus détaillées montrent que de tels trous de ver ne peuvent pas se former dans l'effondrement gravitationnel d'une étoile : aussitôt constitués, ils seraient détruits et bouchés avant qu'aucune particule n'ait le temps de les traverser. Des modèles suggèrent que les trous de ver pourraient cependant exister à l'échelle microscopique. En réalité, la structure la plus intime de l'espace-temps pourrait être constituée d'une mousse perpétuellement changeante de micro-trous noirs, micro-trous blancs et mini-trous de ver, traversés de façon fugace par des particules élémentaires pouvant éventuellement remonter le cours du temps !

Visualisations virtuelles des trous noirs

Le trou noir est *a priori* parfaitement invisible. Cependant, un trou noir convenablement éclairé est capable de renvoyer une image grâce aux trajets particuliers suivis par la lumière émise dans son voisinage.

Selon la relativité générale, les rayons lumineux suivent des trajectoires d'autant plus incurvées que le champ gravitationnel qu'ils

traversent est intense. Le champ gravitationnel d'un trou noir courbe fortement l'espace-temps dans son voisinage. À partir d'une certaine distance de son centre, qui définit l'« horizon des événements », aucune particule (massive ou non) ne peut échapper à son emprise. À l'extérieur de l'horizon des événements (qui est la surface du trou noir proprement dite), les rayons lumineux peuvent s'échapper, mais l'importante courbure de l'espace-temps modifie considérablement leur trajectoire.

On peut faire confiance aux équations de la relativité générale pour calculer la propagation des rayons lumineux au voisinage des trous noirs. Le calcul nécessite une analyse mathématique préalable, suivie d'une intégration numérique par l'ordinateur. C'est par cette méthode que l'on peut obtenir les images virtuelles d'un trou noir éclairé par des sources de n'importe quelle nature et distribuées de n'importe quelle façon.

Une situation astrophysique intéressante est celle où la source d'éclairage est une série d'anneaux matériels en orbite autour du trou noir. De telles structures, courantes en astrophysique, sont appelées *disques d'accrétion*. Les disques d'accrétion sont composés d'un gaz chaud qui tombe peu à peu en spirale dans le trou noir, de façon analogue au mouvement de l'eau entraînée dans un tourbillon. Sa chute s'accompagne d'une élévation de sa température et d'une émission de rayonnement. Voilà donc une bonne source d'éclairage : le disque d'accrétion brille et illumine le trou noir central. On peut alors s'interroger : quelle est l'image apparente du disque d'accrétion autour d'un trou noir ?

C'est exactement la question que je me suis posée en 1978, et que j'ai été le premier à résoudre dans un article publié un an plus tard dans la revue européenne *Astronomy and Astrophysics*. Ce travail de visualisation numérique des trous noirs a été repris et développé par de nombreux chercheurs, qui ont en outre bénéficié de l'amélioration rapide des performances informatiques. Celles réalisées au début des années 1990 par mon collaborateur Jean-Alain Marck, à l'Observatoire de Paris-Meudon, sont les plus remarquables ([cahier 1, figure 1](#)).

Ces expériences d'illumination, bien qu'idéalisées, ont au moins le mérite de montrer qu'un trou noir, par l'intermédiaire de son champ gravitationnel, agit sur le rayonnement comme une lentille multipliant les images d'une source unique. Supposons alors que la Terre, un trou noir et un astre lointain soient fortuitement alignés. Selon les lois de la relativité générale, la courbure de l'espace-temps au voisinage du trou noir permet à la lumière émise par l'astre situé à l'arrière-plan d'emprunter plusieurs trajets possibles pour parvenir à la Terre. Cette multiplication et cette distorsion des images apparentes par rapport à la source réelle produisent ce que l'on nomme un *mirage gravitationnel*.

Grâce à de grands télescopes, on en a repéré plusieurs dizaines ; toutefois, ces mirages ne sont pas causés par des trous noirs géants, mais plus prosaïquement par des galaxies ou des amas de galaxies situées dans le champ. Dans le cas du trou noir, il faut se contenter de visualiser le mirage gravitationnel qu'il provoquerait sur le fond lointain d'étoiles ou de galaxies à l'aide de simulations numériques. De nombreux chercheurs se sont prêtés au jeu et ont créé des panoramas variés figurant les mirages créés par d'hypothétiques trous noirs passant dans la ligne de visée d'objets célestes classiques. Les vues les plus spectaculaires ont été obtenues en 2006 par Alain Riazuelo, de l'Institut d'astrophysique de Paris, qui a notamment calculé le mirage gravitationnel créé par un trou noir placé passant devant un fond d'étoiles ([cahier 1, figure 2](#)).

Ainsi, toute notre perception de l'espace provient de l'analyse des trajectoires des rayons lumineux, qui épousent naturellement la forme incurvée de l'espace. À travers les images étonnantes créées par les trous noirs et les mirages gravitationnels, la lumière nous donne à voir l'impalpable, l'invisible.

1- Extrait d'une conférence donnée le 23 juillet 2007 à Ajaccio, lors du colloque « L'homme-particules, cycle Science et Humanisme ».

Origine et destin de l'Univers

« En fait, le bout du monde, comme son début lui-même, c'est notre conception du monde. C'est en nous que les paysages trouvent un paysage. C'est pourquoi, si je les imagine, je les crée ; si je les crée, ils existent. »

Fernando PESSOA,
Le Livre de l'intranquillité.

L'explosion primordiale¹

Espace, temps, matière pourraient avoir surgi il y a quelques milliards d'années de ce que les physiciens modernes appellent le « vide quantique ». Depuis, l'Univers se dilate en se diluant et en se refroidissant, la matière s'organisant peu à peu en galaxies, étoiles, planètes. Ceci est la théorie du Big Bang. Une théorie qui marque le début, non pas de l'Univers, mais d'une longue série de malentendus...

Malentendu, d'abord, sur le mot. En français « grand boum » ou « explosion primordiale », il est devenu célèbre dans les années 1960 à la suite d'une émission de radio britannique où il avait été utilisé par dérision par Fred Hoyle, l'un des adversaires les plus acharnés de la théorie ; celle-ci existait depuis trente ans sous le nom d'« atome primitif » et ne décrivait nullement ce que le terme de Big Bang suggère, à savoir une explosion de matière localisée dans l'espace et le temps, éparpillant ses débris dans un espace extérieur préexistant. Le Big Bang n'est pas non plus une théorie de l'origine. C'est une théorie de l'évolution cosmique. La science ne peut parler de création au sens philosophique ou métaphysique du terme ; en revanche, elle peut parler d'évolution dynamique. Ce que nous dit la théorie du Big Bang, c'est que l'Univers évolue, qu'il a une histoire, dont l'intelligibilité remonte à 14 milliards d'années environ.

Deuxième malentendu, historique celui-là, et assorti d'une injustice. On attribue souvent la découverte du Big Bang à l'astronome américain Edwin Hubble. Or ce sont deux pionniers oubliés du public, le Russe Alexandre Friedmann et le Belge Georges Lemaître, qui ont proposé entre 1922 et 1931 cette vision d'un univers dynamique et à l'origine singulière. Il s'agissait là d'un pas conceptuel gigantesque, puisque depuis la plus haute Antiquité, le ciel était considéré comme dépourvu de toute évolution. Les modèles cosmologiques de Friedmann et Lemaître, mal compris et mal interprétés de leur vivant, ont eu du mal à s'imposer. Hubble n'y a pas cru ; Einstein lui-même, le père de la relativité, a été fortement réticent. Pourtant, ces modèles sont contenus en germe dans la théorie de la relativité. Il est vrai que Friedmann est mort prématurément, dès 1925, et que Georges Lemaître était prêtre. On l'a donc soupçonné de vouloir accorder sa

thèse cosmologique avec le récit de la Genèse. Or, il n'en était rien.

Troisième malentendu, de nature épistémologique : selon certains, la théorie du Big Bang serait plus proche du mythe que d'un modèle scientifique. Or les modèles de Big Bang sont étayés par des observations qu'aucune autre théorie ne sait expliquer de façon cohérente. Ils fournissent une excellente description de l'Univers durant une grande partie de son évolution, expliquant le noir du ciel, la fuite apparente des galaxies, la proportion des éléments chimiques légers, le nombre d'espèces différentes de neutrinos, l'existence d'un rayonnement micro-ondes diffus uniformément réparti sur le fond de ciel et les petites irrégularités observées dans ce rayonnement.

Dans les modèles relativistes, l'Univers s'identifie à une entité plus générale, l'espace-temps-matière. L'identification entre le monde physique et l'espace (ou l'espace-temps) géométrique reste mal comprise du public. Lorsqu'un conférencier parle de l'expansion de l'Univers, il se voit invariablement poser la question : dans quoi l'Univers gonfle-t-il ? Cette formulation incorrecte, héritée de la conception antique d'un cosmos clos délimité par une sphère ultime, est sans doute accentuée par l'analogie souvent employée entre l'Univers en expansion et la surface d'un ballon que l'on gonfle. La réponse correcte est que l'Univers ne gonfle dans rien du tout, puisqu'il n'y a pas d'espace en dehors de lui-même. La plupart des lecteurs d'aujourd'hui, tout comme les Grecs d'il y a deux mille ans, ignorent toutefois que les mathématiques savent décrire des espaces parfaitement finis (un vaisseau spatial filant toujours droit devant lui reviendrait à son point de départ), mais n'ayant nul besoin d'un espace référent extérieur. De même, à la question : qu'y avait-il avant le Big Bang ?, on peut répondre (et ce n'est pas une pirouette) qu'il n'y avait forcément pas de temps avant que le temps n'apparaisse ! Vers 1230, le philosophe Guillaume d'Auvergne l'avait déjà parfaitement exprimé : « De même que le Monde n'a pas de dehors, n'a pas d'au-delà, puisqu'il contient et embrasse toute chose, de même le temps, qui a commencé à la création du Monde, n'a pas d'auparavant ni de précédemment, puisqu'il contient en lui tous les temps qui sont ses parties. »

Le Big Bang ne décrit pas une origine de l'Univers à proprement parler, mais le début de la phase d'expansion. Le « temps zéro » est inaccessible à l'investigation scientifique et n'a sans doute même pas de sens². Nous sommes incapables de comprendre et de décrire convenablement les conditions extrêmes dans lesquelles s'est déroulée la genèse de l'espace, du temps, de la lumière et de la matière.

Les scientifiques ont toutefois donné des pistes qui permettent de remonter dans le temps. Jusqu'où ? La reconstitution du passé cosmique se heurte à trois limites d'ordre différent : une limite

observationnelle, une limite expérimentale et une limite théorique.

Sur le premier million d'années (environ) de l'histoire cosmique, il n'y a pas d'information astronomique directe car, au cours de cette période, l'Univers était opaque au rayonnement électromagnétique. Aucune image ne nous parvient donc de cette époque. C'est la limite observationnelle.

Malgré tout, les scientifiques ont pu reconstituer les époques plus anciennes en étudiant la physique des particules élémentaires. Les accélérateurs de particules permettent en effet d'augmenter les énergies mises en jeu pour créer des particules, donc de recréer les conditions de l'Univers très primordial. Par la mise en évidence expérimentale de la structure interne des noyaux atomiques (constitués de quarks), on peut dire que l'on a réussi à recréer en laboratoire les conditions qu'a connues l'Univers un millième de milliardième de seconde (10^{-12} seconde) après le début de son expansion, c'est-à-dire lorsque l'Univers était constitué d'une soupe de quarks et d'électrons. C'est, aujourd'hui, la limite expérimentale.

Cependant, les physiciens tentent de reconstituer des époques encore plus primitives à l'aide de théories des particules à haute énergie, non testables expérimentalement, mais dont on peut au moins vérifier la cohérence logique. Le vrai guide dans le retour en arrière cosmique est la *température*, non pas le temps. Théoriquement, le temps zéro correspondrait à une température infinie. Or l'infini est infiniment loin. Il est donc, par définition, *inaccessible*. Ici se situe la limite théorique.

Notons au passage que le temps zéro de l'histoire cosmique, c'est un peu comme la vitesse de la lumière. Dans ce dernier cas, la valeur 300 000 km/s est une limite inaccessible, car la vraie grandeur qui compte est l'énergie qu'il faut conférer à une particule pour l'accélérer à la vitesse de la lumière. Or, cette énergie devient infiniment grande à mesure que l'on s'approche de la limite 300 000 km/s. C'est pour cela que la question « pourra-t-on un jour dépasser la vitesse de la lumière ? » (elle aussi souvent posée par le public) n'a pas de sens, car on ne peut dépasser l'infini.

Sur le compteur température, la physique sait qu'elle est totalement impuissante à décrire les phénomènes au-dessus de la température de Planck, égale à 10^{32} degrés. Pourquoi ? Parce que des effets quantiques interviendraient au cœur même de la structure de l'espace et du temps, empêchant tout calcul physique dans le cadre des théories actuellement développées. À cette barrière de la connaissance correspond un temps aussi bref que 10^{-43} seconde (un cent millionième de milliardième de milliardième de milliardième de milliardième de seconde), appelé *temps de Planck*. Puisque, au-dessus de la température de Planck, la physique ne peut rien dire, elle ne

peut rien dire non plus avant le temps de Planck. Le début de l'histoire intelligible de l'univers, ce n'est donc pas zéro, mais le temps de Planck.

En pratique, entre un temps zéro qui n'a aucun sens physique et un temps de Planck à partir duquel on peut commencer à raisonner, la différence est minime sur le compteur temps (bien qu'infinie sur le compteur température). Il est donc légitime de parler d'un *âge de l'Univers*, évalué depuis aujourd'hui jusqu'au temps de Planck, ou *vice versa* selon que l'on prend l'histoire à reculons ou non. Le chiffre couramment avancé de 15 milliards d'années n'est qu'une valeur imprécise. Il se déduit en effet du taux d'expansion de l'Univers, la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres. Schématiquement, plus les galaxies se déplacent vite, moins elles ont mis de temps pour parvenir au point où elles en sont actuellement. Mais les scientifiques ignorent quelle est la valeur exacte du taux d'expansion. L'âge de l'Univers ne peut, dès lors, être évalué que dans une fourchette de valeurs comprises entre 10 et 20 milliards d'années, d'autant que d'autres paramètres imprécis – tels que la densité de matière et la constante cosmologique – entrent en jeu³. Cet âge est parfaitement compatible avec les mesures directes et indépendantes de l'âge des plus vieux objets dans l'Univers (certaines étoiles et amas d'étoiles). Le contraire sonnerait le glas des modèles de Big Bang !

Certains pensent que la croissance de la complexité, l'apparition de la vie et l'émergence de la conscience sont si « miraculeusement improbables » qu'elles seraient l'indice d'un plan préétabli, codé dans le Big Bang. Or, il n'est pas sérieux de considérer l'homme comme le but suprême de l'organisation cosmique. Les scientifiques ne parlent que de ce qu'ils connaissent, et en ce qui concerne les origines de la vie, notre connaissance est limitée à ce grain de sable qu'est la Terre. Si l'homme est l'espèce la plus complexe (sur le plan de l'organisation cérébrale) connue aujourd'hui, cela n'exclut ni une évolution ultérieure de l'espèce humaine, ni l'apparition de nouvelles espèces avec des niveaux de complexité différents, aussi bien sur Terre qu'ailleurs. Il est tout à fait possible (et pourquoi pas, probable) qu'en des régions lointaines du cosmos et sur d'autres planètes, d'autres organismes, d'autres formes de vie aient atteint des degrés d'évolution largement supérieurs à celui de l'espèce humaine. Ils n'en ont pas forcément, d'ailleurs, une conception plus objective de l'origine.

1- D'après « La quête des origines », article paru en décembre 1997 dans *Le Nouvel Observateur*, hors série, n° 31.

2- Précisément, les modèles dits de « pré-Big Bang » développés depuis lors, sur la base de théories de gravitation quantique, éliminent toute notion de temps zéro [*Note ajoutée pour la présente édition*].

3- Après la parution de cet article, des progrès expérimentaux considérables ont permis de fixer l'âge de

l'Univers à 14 milliards d'années, voir l'article suivant *[Note ajoutée pour la présente édition]*.

Le récit du Big Bang¹

L'astrophysique et la cosmologie nous offrent aujourd'hui des indices permettant de remonter pas à pas le fil de l'histoire cosmique. Évolution de la vie modelée par la chute d'astéroïdes géants, naissance du système solaire déclenchée par l'explosion d'étoiles, genèse des éléments au cœur des supernovæ, origine de l'espace et du temps déchiffrée dans le rayonnement fossile, les ultimes mystères du Big Bang : un parcours de 14 milliards d'années dans notre histoire la plus profonde.

Au-delà des interrogations philosophiques, métaphysiques ou religieuses, la question des origines de l'Univers n'est devenue réellement scientifique qu'au XX^e siècle, dans le cadre de l'astrophysique et de la cosmologie moderne.

Faisons d'abord un petit retour en arrière vers la Grèce antique, avec la fresque bien connue de Raphaël, *L'École d'Athènes*, où figure dans un saisissant raccourci temporel l'aréopage des philosophes anciens qui ont bâti le socle de notre civilisation occidentale. Dans cette assemblée prestigieuse, on trouve notamment Parménide et Héraclite. Avec eux nous avons deux visions antagonistes sur la vérité philosophique de notre monde. Parménide est en effet le philosophe de la permanence de l'Être. Les fragments qui nous restent de ses écrits décrivent un monde qui ne change pas ; or, un monde qui ne change pas ne peut avoir d'origine, car l'origine implique une évolution ultérieure. À l'opposé, Héraclite est le philosophe du changement. Il décrit par exemple l'évolution de l'Univers comme un feu qui naît, s'embrase, puis s'éteint et renaît à nouveau. C'est le mythe de l'*ekpyrosis*, dans lequel le monde se purifie par le feu et renaît constamment de ses cendres, comme un phénix. Le monde selon Héraclite a donc une origine, voire plusieurs, inscrites dans des cycles de répétition.

La conception d'un monde sans origine se retrouve chez Aristote, figure centrale du tableau de Raphaël aux côtés de Platon. Pour le Stagirite, l'Univers en soi et ses éléments fondamentaux (terre, eau, air, feu) s'inscrivaient dans un temps éternel. Seuls certains corps particuliers avaient été créés : les créatures, précisément. Cette

les piliers de base de la physique moderne : la théorie de la relativité générale (qui décrit l'interaction gravitationnelle) et la théorie de la mécanique quantique (qui décrit les interactions entre particules élémentaires), ainsi que des premiers résultats observationnels à signification cosmique ; entre 1915 et 1930, des astronomes munis des plus puissants télescopes de l'époque ont annoncé que les galaxies s'éloignent systématiquement les unes des autres, à des vitesses proportionnelles à leur distance. Ce résultat observationnel est resté incompréhensible jusqu'à ce que la communauté scientifique admette avec réticence une idée précédemment proposée par le mathématicien russe Alexandre Friedmann (en 1922) et le physicien belge Georges Lemaître (en 1927), fondée sur la relativité générale : l'espace entier se dilate au cours du temps. Autrement dit, l'espace est en *expansion*, une expansion qui entraîne l'ensemble des galaxies.

Il s'agissait là d'un pas conceptuel gigantesque. En effet, depuis la plus haute Antiquité, le ciel était considéré comme dépourvu de toute évolution. Certes, depuis la Renaissance on admettait que des phénomènes nouveaux se produisaient dans le ciel, mais personne n'osait envisager que l'Univers puisse globalement évoluer.

Lemaître a poussé les choses plus loin en 1931, avec sa théorie de l'atome primitif, selon lui à l'origine de tout l'Univers. « L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer », écrivait-il. Il s'appuyait sur les observations relatives à la fuite générale des galaxies, et sur les résultats encore embryonnaires d'une branche de la physique en plein développement : la physique nucléaire. Son intuition heurtait les certitudes de l'époque – notamment celles d'Albert Einstein –, selon lesquelles l'Univers devait être éternel, sans début ni fin. Le modèle de l'atome primitif, revu à la lueur des développements ultérieurs, s'est transformé en « modèles de Big Bang ».

Les modèles de Big Bang

Les modèles élaborés par Friedmann et Lemaître supposent négligeables les irrégularités de la distribution de matière, de sorte que l'Univers a partout les mêmes propriétés ; l'espace est dit « homogène et isotrope ». Sa courbure est constante, mais il reste à en préciser le signe. Trois familles d'espaces sont possibles : l'espace euclidien (c'est-à-dire à courbure nulle, celui dont nous connaissons bien les propriétés), l'espace sphérique (à courbure positive) et l'espace hyperbolique (à courbure négative). La différence se joue dans la quantité moyenne de matière et d'énergie contenue dans l'Univers – puisque, en relativité générale, la matière-énergie sculpte la géométrie de l'espace-temps. En dessous d'un certain seuil critique

de densité, l'espace est hyperbolique ; au-dessus il est sphérique – n'étant euclidien qu'à la frontière exacte. Les conséquences sur la dynamique cosmique sont considérables : selon les proportions respectives des formes d'énergie qui emplissent le cosmos, l'espace peut être « fermé » dans le temps, c'est-à-dire qu'après sa phase actuelle d'expansion il entrera en contraction et son histoire s'achèvera dans un « Big Crunch » ; il peut aussi être « ouvert », c'est-à-dire que son expansion se poursuivra éternellement, soit en décélérant, soit en accélérant constamment. Ce n'est que depuis les cinq dernières années que les observations astronomiques sont suffisamment précises pour trancher les alternatives théoriques : il semblerait que l'Univers soit actuellement en expansion accélérée, son contenu matériel étant largement dominé par une forme d'énergie noire et « répulsive », peut-être attribuable au vide quantique. Cependant on ne sait toujours pas si l'espace est fini ou infini, car la question de la finitude ou de l'infinitude de l'espace relève, non pas de la relativité générale, mais d'une branche de la géométrie appelée *topologie*. Les modèles d'« univers chiffonné » que j'ai développés tentent de répondre à ces questions fondamentales.

Ceci pour le destin futur de l'Univers. Quant à son passé, tous les modèles ont dans leur passé un « temps zéro » qui marque, sinon l'origine de toutes choses, du moins le début de l'expansion cosmique : le Big Bang. C'est, en fait, une extrapolation mathématique conduisant à une « singularité », c'est-à-dire une température, une densité et une courbure de l'espace infinies. Le physicien sait pertinemment que les modèles de Big Bang *stricto sensu* cessent d'être valides à la singularité. Il faudrait réviser nos théories pour mieux cerner le début de l'expansion cosmique (il n'est même pas certain que cela soit possible). Le vrai Big Bang des physiciens n'est donc pas le « temps zéro » ni le début d'une gigantesque explosion, comme on le lit trop souvent dans la vulgarisation, mais une phase très ancienne de l'Univers, lorsque ce dernier était extraordinairement chaud et dense. Or le fait que l'Univers ait été chaud et dense dans son passé est aujourd'hui prouvé expérimentalement.

Le Big Bang aujourd'hui

Après cinquante années d'incrédulité générale, la théorie du Big Bang a fait ses preuves, étayée par de nombreuses observations qu'aucun modèle alternatif ne sait expliquer. Aussi, les modèles de Big Bang sont-ils aujourd'hui quasi unanimement adoptés par les astrophysiciens. Conjugués aux observations accumulées tant par les grands télescopes que dans les accélérateurs de particules, ils permettent de retracer les principales étapes de l'histoire de l'Univers,

longue d'environ 14 milliards d'années.

Très schématiquement, l'histoire de l'Univers, depuis le Big Bang jusqu'à aujourd'hui, se résume en une dilatation accompagnée d'un refroidissement. L'Univers très primitif était si chaud et dense qu'il était opaque. Trois cent mille ans plus tard, il a émis sa première lumière, que l'on capte aujourd'hui dans les radiotélescopes sous forme du « rayonnement fossile ». Moins de 1 milliard d'années plus tard se sont formées les premières galaxies, dont, sans doute, la nôtre, la Voie lactée. Au sein de celle-ci, plusieurs générations d'étoiles se sont succédé. Le Soleil s'est condensé une dizaine de milliards d'années plus tard, soit, en reprenant le chronomètre à partir du présent, il y a environ 5 milliards d'années. Assez rapidement les planètes se sont agglomérées, les datations les plus précises sur l'âge de la Terre indiquant 4,566 milliards d'années. La vie aquatique, sous forme des stromatolithes, est apparue très vite, il y a 3,5 milliards d'années. L'émergence de la conscience sur Terre, que l'on associe à l'*Homo sapiens*, est incroyablement récente : 200 000 ans

La principale leçon à retenir de l'histoire cosmique, c'est que la dilatation et le refroidissement de l'Univers ont permis la formation progressive de *structures*. À partir d'un état initial chaotique, c'est-à-dire relativement désordonné et simple, la complexité a peu à peu émergé. Autrement dit, l'Univers a prodigieusement évolué, à tel point que des êtres vivants et conscients (les hommes, mais sans doute d'autres formes conscientes ailleurs) sont capables de remonter le fil de son histoire jusqu'au chaos initial !

Le chiffre actuellement obtenu par de complexes mesures astronomiques donne 13,7 milliards d'années pour l'âge de l'Univers. Si cette valeur est relativement précise (à deux cents millions d'années près), la chronologie des événements est encore plus solidement établie, avec une précision qui peut même stupéfier. La raison de cette précision est qu'à très haute température, tous les processus se déroulent beaucoup plus vite qu'à basse température. Entre, disons un milliardième de seconde et un millionième de seconde après le temps de Planck, il s'est donc passé « autant » d'événements physiques qu'entre, disons un milliard et dix milliards d'années ! Une imprécision de quelques millions d'années sur la durée de vie d'une étoile, par exemple, est du même ordre qu'une imprécision de quelques milliardièmes de seconde sur le temps de vie d'une particule élémentaire !

Le premier découplage

Durant l'ère de Planck, le temps, l'espace et toutes les grandeurs physiques usuelles se mêlent inextricablement, au point de perdre tout

leur sens actuel. L'Univers est dans un état au-delà de ce que l'esprit humain peut actuellement concevoir. Des scénarios spéculatifs de « cosmogénèse quantique » tentent d'expliquer comment serait apparu l'Univers à la fin de l'ère de Planck. Certains supposent que l'Univers, ou même une infinité de bulles d'univers différentes, ont surgi « spontanément » du vide quantique, un peu comme les gouttes d'écume qui se détachent d'un océan. Les premières particules élémentaires (imaginées sur le papier, car mille milliards de fois plus massives que ce que peuvent produire les plus modernes accélérateurs de particules) surgissent du vide quantique, et leurs relations sont régies par une superforce primitive unique. Le vide est bouillonnant d'énergie et de particules virtuelles, massif et doté d'une propension à l'expansion. Ainsi naît la fameuse expansion de l'Univers qui s'opère en tout point d'un espace peut-être infini, et non pas depuis un seul centre localisé (à cet égard, l'analogie souvent utilisée du ballon que l'on gonfle est trompeuse). De même, le mouvement général n'est pas celui de la matière dans un cadre géométrique fixe, mais une dilatation de la trame elle-même, du « tissu élastique » de l'espace-temps. Entre tous les corpuscules, il y a production d'espace. En même temps, la superforce universelle qui régissait tout se scinde en deux : la gravitation, et une interaction « électroforte » gouvernant les relations entre particules.

De 10^{-43} à 10^{-32} seconde : les premières particules

La température diminuant à 10^{27} degrés, l'interaction électroforte se scinde en deux modes : l'interaction forte et l'interaction électrofaible. La physique des particules de très haute énergie suggère que, lors de cette « brisure de symétrie », des phénomènes physiques très brutaux se produisent, notamment l'*inflation* – brève période hypothétique durant laquelle les dimensions de l'univers primitif auraient augmenté dans des proportions vertigineuses. À cette époque déjà, une petite préférence de la nature pour la matière – au détriment de l'antimatière – aurait suffi à faire disparaître cette dernière. Les particules hypermassives initiales se désintègrent pour engendrer les constituants fondamentaux de la matière actuellement connus : quarks, électrons, neutrinos.

De 10^{-32} à 10^{-6} seconde

À 10^{-11} seconde, la température tombe à 10^{15} (un million de milliards) degrés. L'interaction électrofaible se scinde en deux, l'interaction électromagnétique et l'interaction faible. Sont désormais en présence, et découplées, les quatre interactions fondamentales régissant l'Univers actuel. L'interaction gravitationnelle est celle qui

modèle l'Univers à l'échelle des planètes, des étoiles et des galaxies. L'interaction électromagnétique s'exerce sur les particules chargées et régit les phénomènes lumineux et chimiques. L'interaction nucléaire forte explique la cohésion des noyaux atomiques et produit l'énergie des centrales nucléaires. L'interaction faible est responsable de la désintégration radioactive du neutron en proton.

Les conditions physiques pour l'apparition de structures complexes sont désormais en place.

De 10^{-6} seconde à 100 secondes : des particules aux éléments

À 10^{-6} (un millionième) seconde, la force nucléaire forte rapproche les quarks trois par trois, qui forment ainsi les premiers protons et neutrons (noyaux, ou nucléons). La température de l'Univers est tombée à un milliard de degrés.

Depuis les premiers instants, l'Univers se dilate. Puisque l'espace entre les particules de matière augmente, les chocs entre les particules se raréfient. Un phénomène extrêmement important se produit environ 100 secondes après le début de l'expansion : la nucléosynthèse primordiale. (Un livre célèbre de l'astrophysicien américain Stephen Weinberg, *Les Trois Premières Minutes de l'Univers*, décrit précisément la formation des premiers éléments.) L'Univers refroidi reste suffisamment chaud – entre 10 milliards et 100 milliards de degrés – pour que les protons se combinent entre eux et avec quelques neutrons, formant ainsi les noyaux atomiques les plus simples : le noyau d'hydrogène – constitué d'un seul proton –, ses isotopes (deutérium, tritium) puis l'hélium-3, l'hélium-4 et le lithium-7 (faisant intervenir des neutrons). Ce sont les éléments les plus légers dans la classification périodique de Mendeleïev. Cette phase de nucléosynthèse est brève, car l'Univers se refroidit si vite qu'il n'a pas le temps de fabriquer d'éléments plus lourds que le lithium. Ainsi, 99 % de la matière atomique est formée dès cette époque. Elle est composée de 75 % de protons, c'est-à-dire d'hydrogène, et de 24 % d'hélium. Le 1 % restant, constitué des éléments chimiques lourds de carbone, azote, oxygène, etc., sera élaboré bien plus tard, dans le cœur des étoiles.

La nucléosynthèse permet de mettre à l'épreuve les modèles de Big Bang. En effet, ces derniers permettent de calculer la proportion d'hydrogène, d'hélium, de deutérium, etc., produite à partir d'un mélange initialement constitué de protons et de neutrons. Ces abondances, ou « fractions de masse » théoriques, sont comparées à ce qui est aujourd'hui observé dans l'Univers. La concordance est excellente : il y a bien 75 % d'hydrogène et entre 24 et 25 % d'hélium.

Quant aux proportions observées du deutérium et du tritium, elles imposent des contraintes très fortes sur les modèles de Big Bang, et confirment de façon spectaculaire leur validité.

L'origine de la lumière

Jusqu'ici, l'Univers était resté opaque au rayonnement. Les photons, particules du rayonnement, étaient constamment déviés de leur trajectoire en interagissant avec les innombrables électrons et protons. Jusqu'à trois cent mille ans environ, l'Univers est une sorte de « soupe » où se mélangent les particules et le rayonnement.

En se dilatant et en se refroidissant à la température de 3 000 degrés, l'Univers permet enfin le découplage entre la matière et le rayonnement. Le libre parcours moyen du photon passe de quelques centimètres à plusieurs millions d'années-lumière. Autrement dit, les photons ne sont plus absorbés par les particules environnantes, ils s'échappent de la gangue qui les emprisonnait. L'Univers devient complètement transparent au rayonnement et il émet son premier signal électromagnétique. C'est le « rayonnement de fond cosmologique ». En 1964, les astronomes Arno Penzias et Robert Wilson, alors qu'ils cherchaient à étalonner une antenne radio, ont constaté que quelle que soit la direction dans laquelle ils orientaient l'antenne, elle enregistrait un bruit de fond parasite : ils venaient de capter accidentellement les restes du rayonnement primitif, sous forme fossile. C'est un rayonnement dit « de corps noir », un prototype idéal de rayonnement dont les caractéristiques en fréquence sont déterminées par la température. Émis à une température de 3 000 degrés, le rayonnement cosmologique nous parvient à une température mille fois plus basse, car entre le moment où il a été émis – il y a 14 milliards d'années – et le moment où il est reçu – aujourd'hui – l'Univers s'est dilaté d'un facteur 1 000. Le rayonnement fossile nous parvient donc dans la gamme des micro-ondes, précisément à 2,7 K au-dessus du zéro absolu (-270°C).

Au début des années 1990, le satellite américain COBE nous a fourni des cartes de ce rayonnement, avec une précision du cent millième de degré. Plus récemment (février 2003), le satellite WMAP a considérablement affiné ces cartes. Les mesures du rayonnement fossile permettent de reconstituer le visage de l'Univers naissant. Ce sont sans doute parmi les images les plus émouvantes de toute l'histoire de l'astronomie, car ces cartes représentent l'état de l'Univers jeune de 400 000 ans, à l'époque où il n'était qu'une soupe lisse et homogène. Aucune structure astronomique de type étoile, galaxie, planète, n'existait. Seuls de très légers frissonnements agitaient la soupe. Les cartes de COBE et de WMAP exhibent en effet de

minuscules inhomogénéités de température. Toutefois, l'écart entre la région la plus chaude et la région la plus froide n'est que d'un cent millième de degré. Ces variations sont liées à des variations de densité : les régions les plus froides sont aussi les moins denses. On voit donc là *l'origine de toutes les structures astronomiques*. En quelque sorte les fœtus de galaxies !

Les premiers atomes et molécules (un million d'années)

Les électrons, poussés par l'interaction électromagnétique, se combinent aux noyaux d'hydrogène et d'hélium pour former les premiers assemblages électriquement neutres : les atomes d'hydrogène et d'hélium. Les atomes eux-mêmes, à plus basse température, s'associent en molécules. Les vastes nuages d'hydrogène moléculaires sont nés, matrices de toutes les étoiles à venir.

La formation des galaxies (un milliard d'années)

L'action de la gravité accentue les infimes excès de densité du gaz primordial. Chaque grumeau dans la soupe homogène attire plus de matière, devient plus dense que son voisinage, et finit par donner naissance à une structure astronomique. Ces premières structures sont apparues vraisemblablement au bout de quelques centaines de millions d'années d'évolution cosmique, à partir des premiers nuages de gaz. Mais comment sont nées en détail les galaxies qui tapissent la voûte céleste par centaines de milliards ? Comment l'Univers primordial, aussi uniforme qu'une mer d'huile, a-t-il pu façonner ces énormes inhomogénéités en un temps si bref ? En certains endroits en effet, la matière dans les grumeaux se désolidarise du flot général de l'expansion et se contracte. Se forment ainsi des paquets de masse isolée. On ne connaît ni leur taille et leur masse (étoiles, ou galaxies, ou amas, ou super-amas) ni leur composition (formée de 90 à 99 % de matière noire non rayonnante). En d'autres termes, on ignore encore si les plus grandes structures (amas et superamas de galaxies) sont apparues d'abord, puis se sont fragmentées en structures plus petites (galaxies, étoiles), ou si, à l'inverse, les étoiles sont apparues d'abord, puis se sont regroupées, sous l'action de la gravitation, en structures plus vastes.

Les superamas de galaxies sont de gigantesques ensembles constitués de dizaines, voire de centaines de milliers de galaxies. Ils sont entourés de régions pratiquement vides de galaxies. Pourquoi ? Si vous faites couler un bain, vous engendrez de la mousse. À l'intérieur des bulles, il y a pratiquement du vide, et la matière, l'eau en

l'occurrence, se répartit sur les parois des bulles. Lorsque vous avez deux bulles en contact, il y a encore plus de matière à l'intersection des bulles. L'Univers pourrait, à très grande échelle, avoir une structure ressemblant à de la mousse de savon. Les galaxies, les amas et les superamas de galaxies se répartiraient autour des parois de gigantesques bulles cosmiques, pratiquement vides de matière (de matière visible tout au moins).

On a recensé plusieurs milliards de galaxies, et on estime qu'il y en a au total 100 milliards dans l'univers observable. Il y en a de plusieurs formes : des elliptiques, des spirales, des lenticulaires, des irrégulières. On ne comprend d'ailleurs pas bien pourquoi.

Notre galaxie, la Voie lactée, est une galaxie spirale, née vraisemblablement en même temps que les autres. Les galaxies sont essentiellement constituées d'hydrogène, en interaction avec des étoiles et des grains de poussière. Elles connaissent au cours de leur histoire une évolution chimique très importante, conditionnée par les interactions et les échanges permanents entre étoiles, nuages de gaz interstellaire et poussières. Plongeons dans la Voie lactée.

Origine et évolution des étoiles

Les étoiles se forment au sein des nuages d'hydrogène gazeux, par condensation gravitationnelle. Dans le nuage, il y a un excès de densité ; cette région attire beaucoup de poussières et devient obscure. Soumise à sa propre gravité, elle se contracte et chauffe. C'est ainsi que par « échographie » infrarouge, on distingue dans les nuages de gaz des fœtus d'étoiles. Il s'agit d'étoiles pas encore bien formées par la gravitation.

Puis les nouveau-nés sortent de leur matrice, leur accouchement dure environ cent mille ans. Dans leur adolescence, durant quelques millions d'années, elles continuent à se contracter et à se débarrasser du nuage gazeux qui les a engendrées. Lorsque, au cœur de la jeune étoile, la température atteint 15 millions de degrés, l'hydrogène (son constituant dominant) fusionne en hélium et libère de l'énergie. L'étoile entre alors dans une phase de remarquable stabilité, sa « maturité », car la libération d'énergie accompagnant ces transformations nucléaires contrebalance l'action de la gravitation. La contraction cesse, l'étoile entre dans sa phase adulte, dite de « séquence principale ». La durée de cette phase dépend de la masse de l'étoile. Dix milliards d'années pour une étoile de masse modeste comme le Soleil, beaucoup moins pour les étoiles plus massives.

Au sortir de la séquence principale, l'hélium se met à brûler à son tour, pour former du carbone, de l'oxygène, du magnésium, etc. La grande histoire des éléments chimiques commence. L'évolution

nucléaire des étoiles réalise le vieux rêve des alchimistes : fabriquer des éléments de plus en plus lourds (et rares) à partir d'un matériau simple. Les étoiles massives forment tous les éléments jusqu'au fer. Lorsqu'elles ont développé un cœur de fer, elles ont acquis une structure en pelure d'oignon, c'est-à-dire qu'elles sont formées de couches successives en combustion, les éléments les plus lourds étant les plus proches du centre. Le fer étant inapte à fournir de l'énergie thermonucléaire, le poids énorme de l'étoile n'est plus compensé par le débit d'énergie. Le centre de l'étoile s'effondre sous son propre poids et forme un noyau extrêmement dur : une étoile à neutrons. Sur elle rebondissent les couches extérieures de l'étoile. C'est ainsi que l'implosion du cœur provoque l'explosion de la périphérie. L'étoile devient *supernova*. Ce véritable cataclysme stellaire se produit pour les étoiles au moins dix fois plus massives que le Soleil et projette dans les espaces interstellaires les éléments chimiques lourds qui ont été fabriqués au centre de l'étoile défunte. Ainsi vit une génération d'étoiles.

Dans l'histoire de l'Univers, une première génération s'est formée assez rapidement. Les étoiles massives ont rapidement évolué, ont explosé en supernovæ et ontensemencé d'autres nuages interstellaires. La deuxième génération d'étoiles s'est formée ensuite, non seulement à partir d'hydrogène et d'hélium, mais aussi avec des éléments plus lourds qu'elle avait incorporés dès sa naissance. Évoluant à son tour, elle engendrera d'autres générations d'étoiles, enrichissant sans cesse la galaxie en éléments chimiques lourds.

Origine du système solaire

Notre soleil est né voici 4,6 milliards d'années au sein d'un nuage interstellaire : la nébuleuse protosolaire. Sa condensation s'est sans doute déclenchée à la suite de l'explosion d'une supernova dans son voisinage. L'instabilité causée par l'explosion aurait entraîné la formation de plusieurs étoiles, dont le Soleil. Nous disposons d'un témoin de cette époque : la météorite Allende, tombée en 1969, se trouvait déjà dans la nébuleuse protosolaire et a enregistré la suite des événements ayant conduit à l'accouchement du Soleil et des planètes. C'est son analyse isotopique qui permet d'attribuer l'âge de 4,566 milliards à notre système solaire.

Autour du Soleil, les planètes se sont probablement formées au même moment, par agglomération progressive de poussières, de gaz et de grains. Le système solaire a rapidement évolué en quelques dizaines de millions d'années. Il est constitué des planètes, mais aussi de dizaines de milliers d'autres corps rocheux de tailles diverses que sont notamment les comètes, les astéroïdes, les météorites, etc. Les

planètes les plus lointaines (à partir de Jupiter) sont gazeuses, à l'exception de Pluton et des corps glacés plus lointains appartenant à la « ceinture de Kuiper ». Le peu de chaleur qu'elles reçoivent du Soleil leur a permis de conserver leurs éléments légers, leurs principaux constituants, et notamment l'hydrogène. Sur les planètes proches du Soleil, les éléments légers se sont évaporés et ce sont donc des planètes rocheuses.

Les planètes

Parmi les planètes telluriques, Mercure est la plus proche du Soleil. Sa surface criblée de cratères d'impacts météoritiques ressemble beaucoup à celle de la Lune. L'ensoleillement est dix fois plus fort que sur Terre, et comme il n'y a pas d'atmosphère, il n'y a pas d'effet de serre. Le jour, la température atteint 430 °C et la nuit, elle descend à – 170 °C.

Vénus a longtemps été le symbole de la beauté, la déesse de l'amour et du printemps. Recouverte de voiles épais, les hommes rêvaient de caresser sa surface. Le 12 décembre 1962, le vieux rêve s'est brisé : les signaux émis par la sonde Mariner ont indiqué que la belle n'était qu'un enfer stérile, brûlant et sans vie. Son atmosphère, composée à 95 % de gaz carbonique, est cent fois plus lourde que celle de la Terre. La pression qui règne à sa base est égale à celle que l'on rencontre à 1 kilomètre sous la surface des mers. Des vents de 350 km/h emportent d'énormes nuages d'acide sulfurique. Un colossal effet de serre chauffe Vénus à la température de 500 °C. Sous ce brûlant linceul, la surface de Vénus exhibe des plaines bosselées. D'immenses champs de lave ont jailli de volcans jadis actifs. Vénus a eu dans son passé de grandes quantités d'eau, mais celle-ci a bouilli. Vénus est aujourd'hui desséchée.

La Terre gravite à 150 millions de kilomètres du Soleil. C'est la seule planète où l'eau existe en surface à l'état liquide ; recouvrant les trois quarts de sa superficie, cette eau emmagasine la chaleur du Soleil et régule la température moyenne. La Terre est aussi la seule planète dont l'atmosphère contienne de l'oxygène et très peu de gaz carbonique. Cette minuscule quantité de gaz carbonique joue pourtant un rôle essentiel : grâce à l'effet de serre, il maintient la température moyenne à la valeur clémente de + 14 °C . Sans lui, il ferait – 20 °C, les océans gèleraient et la vie telle que nous la connaissons serait impossible.

Mars est deux fois plus petite et dix fois moins massive que la Terre. Son atmosphère est cent fois moins dense et comporte 95 % de gaz carbonique. La température ne monte qu'à 0 °C l'été à l'équateur, et le gaz carbonique reste gelé aux pôles, emprisonné dans des calottes

polaires qui changent de couleur au gré des saisons martiennes. À la surface il n'y a ni canaux ni vastes prairies, mais un relief étrange, fortement accentué. Le canyon de la vallée Marineris mesure 4 000 kilomètres de long et 5 kilomètres de profondeur. Le mont Olympus s'élève à 24 kilomètres au-dessus des plaines. Il y a eu jadis de l'eau sur Mars, d'immenses rivières dont on voit les lits asséchés, des mers et des océans. C'était il y a 4 milliards d'années. Des bactéries sont peut-être alors apparues sur Mars, à la même époque où la vie naissait sur Terre. Mais peu massive, Mars a perdu son atmosphère. Après avoir connu des bouleversements écologiques considérables, elle est donc devenue une planète géologiquement morte. Aujourd'hui, Mars est un désert froid et stérile.

Entre Mars et Jupiter gravitent des milliers de corps rocheux de taille diverse : les astéroïdes. Peut-être une planète n'a-t-elle pu se former par agglomération de tous ces rochers, en raison des forces gravitationnelles exercées par la massive Jupiter. Jupiter est en effet une planète géante. Étant constituée de gaz, elle n'a pas de sol où poser le pied. Les différentes couleurs que l'on voit à sa surface sont des nuages de soufre et d'ammoniac.

La somptueuse planète Saturne est très semblable à Jupiter, hormis qu'elle est entourée d'anneaux constitués de cailloux, de glace et de poussières. Parmi ses satellites, le plus grand est Titan puisque sa taille est intermédiaire entre celles de Mercure et de Mars. Il a conservé une atmosphère épaisse, à base d'azote et de méthane. Son atmosphère, opaque, empêche toute observation visuelle de la surface. On sait cependant que la température au sol atteint -180 degrés. Il pourrait y avoir des lacs, ou même des océans de méthane. Titan aurait donc les constituants nécessaires au développement d'une vie prébiotique, mais il y manque un ingrédient essentiel : l'énergie. Les rayons du Soleil y sont trop faibles, et la température très basse qui en résulte n'est pas favorable à la chimie des êtres vivants.

Après Saturne, on trouve deux autres grosses planètes gazeuses, aussi entourées d'anneaux : Uranus et Neptune. Au-delà, Pluton, accompagnée de son satellite Charon, est le premier représentant d'une multitude de petites planètes glacées.

Le système solaire ne s'arrête pas là. Le vent solaire – flot de particules chargées émises par le Soleil – souffle bien au-delà de Pluton. Quant aux spectaculaires comètes, on pense qu'elles proviennent d'un réservoir très lointain, le nuage d'Oort, dont elles se détachent au hasard des perturbations gravitationnelles. Comme elles sont riches en eau et en molécules organiques, certains chercheurs estiment qu'elles pourraient avoir apporté, avec les météorites, toute la matière organique dont la « biomasse » terrestre est aujourd'hui formée.

La planète bleue

La Terre, joyau du système solaire, est ainsi une planète privilégiée, soumise à des conditions physico-chimiques tout à fait particulières, qui lui ont permis d'avoir un environnement aussi original que son développement.

Comment la matière primitive de la Terre (mélange de gaz carbonique, de méthane, d'ammoniac et de vapeur d'eau) s'est-elle complexifiée pour aboutir aux organismes vivants ? C'est l'une des questions auxquelles astrophysiciens, biologistes, chimistes et scientifiques de nombreuses disciplines s'efforcent de répondre. Quoi qu'il en soit, la Terre est un habitacle fragile. Tout au long de son histoire, elle a été bombardée par d'innombrables corps (comètes, météorites, fragments de comètes, astéroïdes) provoquant des catastrophes écologiques considérables, dont des extinctions massives d'espèces, la dernière datant de la transition crétacé-tertiaire il y a 65 millions d'années.

La Terre se promène en réalité dans un vaste stand de tir cosmique. Des millions de projectiles potentiels, vestiges du système solaire naissant, sillonnent l'espace à grande vitesse. Le terme Near-Earth Objects (Neos) désigne les petits corps du système solaire dont l'orbite s'approche de celle de la Terre. La plupart sont des astéroïdes présentant un danger de collision potentiel. On en connaît plus de mille à ce jour, mais plusieurs dizaines de milliers seront encore répertoriées au XXI^e siècle. Parmi ces Neos, il faut compter environ 500 comètes. Une douzaine se présente chaque année de façon impromptue dans le système solaire interne. L'estimation du danger potentiel d'une collision avec ces comètes inopinées est un exercice très délicat, à cause de leur nombre très élevé, du fait qu'elles peuvent surgir n'importe où et n'importe quand, et parce que le plus souvent elles deviennent visibles lorsqu'elles sont déjà proches de nous. De plus, elles se déplacent près de deux fois plus vite que les astéroïdes.

Puisque les comètes et les astéroïdes peuvent entrer en collision avec la Terre, la communauté scientifique a évalué leurs fréquences moyennes d'impact, fondées sur le nombre supposé de Neos et sur la densité surfacique de cratères terrestres que leurs impacts passés ont laissés.

Les impacteurs de 50 mètres, capables de provoquer des événements du type Tunguska ou Meteor Crater, surviennent avec une fréquence moyenne d'un par siècle. Tous les 300 000 ans environ, la Terre subit une collision avec un corps d'environ 1 kilomètre. À une vitesse typique de 25 kilomètres par seconde, l'énergie dégagée serait supérieure à l'arsenal nucléaire mondial. Un tel impact projetterait tellement de poussières et de cendres dans la stratosphère qu'en

masquant la lumière du Soleil, il ferait disparaître plusieurs saisons d'affilée, provoquant épidémies et famine. La fréquence moyenne d'impact avec un astéroïde ou une comète de 10 kilomètres est de l'ordre de un tous les 100 millions d'années. Il s'agit de la taille critique à partir de laquelle le volume de poussières injectées dans l'atmosphère est capable de plonger la planète dans un long hiver cosmique et de provoquer une extinction massive. Il y a effectivement une correspondance étroite entre les extinctions massives d'espèces et les chutes de météorites géantes. Au moins la dernière en date, la disparition des dinosaures et de nombreuses autres espèces, il y a 65 millions d'années, est liée aux effets globaux engendrés par la chute d'un bolide de 10 kilomètres de diamètre, dont le cratère d'impact a été retrouvé dans le golfe du Mexique.

Les risques de collision entre ces « vagabonds célestes » et la Terre ne sont donc pas seulement une fiction source d'inspiration cinématographique, mais une réalité. Pour l'affronter, les spécialistes se doivent d'envisager sérieusement les parades possibles, qui ne sont pas nécessairement celles que nous avons vues sur les écrans de Hollywood !

La Terre peut donc encore évoluer de manière inattendue. En outre, certains rythmes biologiques (croissance des arbres ou des coraux) et climatiques (mini-glaciations, réchauffements, etc.) sont liés aux cycles solaires. D'infimes variations de l'activité solaire peuvent avoir des répercussions considérables sur l'environnement terrestre, et l'espèce humaine, en quête de ses origines, doit aussi penser à préserver son futur.

Le Big Bang ou l'éternité¹

(réflexions sur les travaux de S. Hawking)

Les travaux de Stephen Hawking tournent tous autour d'une interrogation aussi vieille que l'humanité : l'éternité du temps. Pour tenter d'y répondre de façon pertinente, Hawking utilise l'arsenal de la physique contemporaine poussé jusqu'à ses frontières les plus spéculatives : la relativité générale (théorie de la gravitation), la mécanique quantique (théorie de l'infiniment petit) et le problématique mariage des deux – la gravitation quantique. Il met en œuvre sa stratégie dans deux domaines clés de la recherche théorique : les trous noirs et la cosmologie.

La relativité générale prédit que les étoiles très massives s'effondrent sur elles-mêmes sans limite. Leur champ gravitationnel devient alors si grand qu'il emprisonne la matière et la lumière à l'intérieur d'un « trou noir », zone de non-retour délimitée par une surface appelée horizon. À la fin des années 1960, Hawking et le mathématicien Roger Penrose ont démontré qu'au-delà de l'horizon, l'effondrement doit inévitablement se poursuivre pour atteindre un stade « singulier » où la densité devient infinie. Le temps a-t-il une fin ? Dans le cadre de la relativité la réponse est donc oui : le futur s'arrête aux singularités cachées au fond des trous noirs.

Hawking s'est ensuite attaché, en collaboration avec d'autres chercheurs, à la mise en place d'une « thermodynamique des trous noirs », autrement dit à les modéliser comme des systèmes physiques capables d'interagir avec le milieu extérieur et d'évoluer au cours du temps. Tenant compte des corrections de la mécanique quantique, Hawking a démontré en 1974 que les trous noirs ne sont pas complètement noirs mais qu'ils émettent des particules et du rayonnement, exactement comme un corps chaud.

Certes, l'évaporation est totalement négligeable pour les trous noirs de masse stellaire, mais elle deviendrait prépondérante pour les « micro-trous noirs » qui auraient pu se former dans l'Univers très primitif. Cette découverte théorique du rayonnement quantique des trous noirs a permis de comprendre que les trous noirs, outre leur

intérêt astrophysique, jouent le rôle d'une pierre de Rosette dans le déchiffrement des liens encore mystérieux entre gravité, quantas et thermodynamique.

Ces liens sont aussi mis à l'épreuve en cosmologie, la science de l'Univers considéré comme un tout. L'expansion des galaxies suggère que, dans un passé lointain d'environ 15 milliards d'années, l'Univers a dû être petit, dense et très chaud ; elle pose donc la question d'un « début du temps », tout au moins d'un début de l'évolution cosmique. C'est le fameux Big Bang, que certains voudraient identifier au *Fiat lux* de la Genèse, mais qui, pour les physiciens, pose le problème des conditions initiales. Le premier travail cosmologique de Hawking a consisté à démontrer, toujours avec Roger Penrose, que l'existence d'un début du temps (un état de densité infinie dans le passé cosmique) découle inéluctablement de la théorie de la relativité générale². Pour cela, ils ont remarqué que l'expansion de l'Univers à partir d'un point singulier initial est l'inverse temporel de l'effondrement de la matière au centre des trous noirs.

En tant que singularité de la théorie classique, le Big Bang est une limite absolue à la compréhension du début de l'Univers, puisque les lois de la physique n'y sont plus valables. Tous les travaux ultérieurs de Hawking ont donc consisté à incorporer la mécanique quantique dans la cosmologie relativiste, de façon à éliminer la singularité et, par là même, définir les conditions initiales de l'Univers.

Avec Jim Hartle, Hawking a proposé une solution possible dans laquelle l'espace et le temps ne sont pas infinis mais n'ont ni frontière ni bord – de même que la surface d'une sphère, mais avec deux dimensions supplémentaires. Autrement dit, dans ce modèle particulier, l'Univers n'a pas eu de commencement, et l'éternité du temps retrouve sa place. Les corrections quantiques inversent la perspective par rapport à la théorie classique.

On le voit, Hawking a toujours travaillé aux frontières les plus spéculatives de la physique théorique, généralement hors de portée des vérifications expérimentales. Il se démarque en cela du courant majoritaire des physiciens « pragmatiques », qui estiment qu'une théorie, aussi belle soit-elle, n'a de vraie valeur que si elle supporte la confrontation avec l'observation.

À mon sens la portée du travail de Hawking est autre. Temps, éternité, naissance, mort... sont des mots prégnants qui dépassent le cadre de la rationalité physique. Hawking est mieux placé que quiconque pour juger de la précarité de la condition humaine face à l'immensité cosmique³. La force intellectuelle qui l'anime illustre puissamment qu'il y a dans la connaissance le signe d'une transcendance. C'est cet aspect fondamentalement « revendicateur » de l'homme, aussi faible soit-il, face au cosmos, qui fait sa grandeur.

1- Article initialement paru en février 1993 dans le magazine *Sciences & Avenir*.

2- Une première démonstration, due à Georges Lemaître, remonte à 1933, mais est passée longtemps inaperçue *[Note ajoutée pour la présente édition]*.

3- Rappelons que Stephen Hawking est atteint d'une dystrophie neuromusculaire qui le laisse presque complètement paralysé *[Note ajoutée pour la présente édition]*.

À la recherche du temps zéro¹

Le début du temps

La cosmologie se propose de reconstituer les événements présents et passés de l'histoire cosmique à partir d'observations, d'expériences de laboratoire et de modèles théoriques censés représenter au mieux l'Univers. Nous observons de manière directe l'expansion de l'Univers, qui se traduit par le fait que toute distance cosmique augmente avec le temps. Quantitativement, on l'exprime par l'intermédiaire d'un étalon de longueur cosmique dépendant du temps, le facteur d'échelle $R(t)$: toute configuration cosmique d'extension suffisamment grande – par exemple, la distance entre une galaxie lointaine et la nôtre, ou bien, dans un modèle d'espace fini, son diamètre – voit ses dimensions augmenter proportionnellement à $R(t)$. En remontant le film de l'expansion à l'envers, le cosmologiste est naturellement conduit à se demander si le temps cosmique t se prolonge, dans le passé de l'Univers, jusqu'à une valeur infinie, ou bien s'il est borné à une valeur finie. En ce cas, il y aurait un « temps zéro » où le facteur d'échelle, et par conséquent toutes les longueurs cosmiques ont pris une valeur nulle. Cet événement singulier aurait présidé à l'« apparition » même de l'espace, du temps et de la matière.

Selon la théorie de la relativité générale, la réponse dépend du contenu de l'Univers. Si ses propriétés sont celles de la matière ou du rayonnement que nous connaissons, alors le facteur d'échelle R diminue inexorablement avec le temps passé, et il existe nécessairement un instant t_0 passé où sa valeur $R(t_0)$ s'est annulée. La durée finie $t_U = t_{\text{aujourd'hui}} - t_0$ représente ce que l'on appelle l'« âge de l'Univers ». C'est ce qu'énoncent les modèles de Big Bang : ils sont définis comme ceux où l'expansion cosmique ne s'écoule que depuis une durée finie.

Calculs et observations situent le « temps zéro » à 14 milliards d'années dans le passé. Cela exclut évidemment de considérer tout instant antérieur à t_0 . Cela implique aussi qu'il ne peut exister aucun objet dont l'âge puisse dépasser t_U , soit 14 milliards d'années, et qu'aucune horloge n'a jamais pu mesurer une durée plus longue. Notons que les âges mesurés des étoiles se distribuent précisément

entre 0 et 14 milliards d'années. À elle seule, cette observation constitue un argument remarquablement direct en faveur des modèles de Big Bang. Mais ceux-ci sont également confirmés par une pléiade d'autres résultats : l'abondance observée des éléments légers, la découverte du rayonnement de fond cosmologique et de ses propriétés, l'évolution des galaxies... tous ces résultats militent en faveur des modèles de Big Bang. Aussi ces derniers sont-ils aujourd'hui quasi unanimement adoptés par les astrophysiciens. Conjugués aux observations accumulées tant par les grands télescopes que dans les accélérateurs de particules, ils permettent de retracer les principales étapes de l'histoire de l'Univers².

Le spectre du temps fini

Le fini temporel préoccupe le physicien. La raison essentielle est que, dans le cadre de la relativité générale, la limite temporelle passée t_0 se présente sous la forme d'une « singularité » : l'univers aurait dû être concentré dans un volume infiniment petit, infiniment dense, et de courbure infiniment grande. Cette singularité initiale marque une réelle interruption (vers le passé) des lignes d'univers des galaxies, et donc du temps. Elle n'est pas considérée comme un *événement* : elle n'a pas pris place et n'a pas eu lieu. Par là même, elle échappe nécessairement au champ de nos théories.

Pour le mathématicien, la singularité constitue un *bord temporel*, situé à une durée passée finie. Difficile à admettre ! Le problème de la finitude spatiale avait longtemps buté contre une telle question de limite, jusqu'à l'introduction des géométries non euclidiennes et des topologies multiconnexes, qui permettent de considérer sans contradiction aucune un espace fini mais sans limite. Le bord temporel pose toutefois un problème d'une autre nature, tenant à la fois à son caractère fini – finitude du temps correspondant à l'arrêt brutal des lignes d'univers – et à son caractère infini – valeurs inconcevablement grandes de la densité et de la courbure.

C'est la raison pour laquelle les cosmologistes ont cherché à se débarrasser de cette « monstruosité » et tenté de démontrer que le temps zéro n'a pas pu réellement se produire. Certains ont suggéré que l'utilisation d'hypothèses simplificatrices injustifiées avait peut-être faussé les calculs ; elle aurait fait apparaître dans les solutions des équations de la relativité générale une singularité qui n'existerait pas réellement. Ce fut un échec. Georges Lemaître avait, dès 1933, esquissé une démonstration capitale selon laquelle les singularités cosmologiques sont une conséquence inéluctable de la relativité générale, moyennant des hypothèses raisonnables. Il anticipait ainsi les fameux « théorèmes sur les singularités », redémontrés de façon

plus générale dans les années 1960 et qui rendront célèbres leurs auteurs, Stephen Hawking et Roger Penrose : l'inévitable présence d'une singularité cosmique dans le passé de n'importe quel modèle d'univers, pour peu qu'il satisfasse à la relativité générale et contienne autant de matière que ce qui est observé.

Seule solution pour se débarrasser des infinis gravitationnels : sortir du cadre de la relativité générale classique. Et c'est bien la voie qui semble raisonnable, car tout pousse les physiciens à considérer que l'apparition d'une singularité, caractérisée par des grandeurs infinies, marque la limite de validité d'une théorie. La relativité générale (ni aucune autre théorie de la gravitation proposée) n'est pas une théorie complète, faute d'incorporer les préceptes de la physique quantique qui décrit le monde microscopique. Il semble donc extrêmement téméraire, et même injustifié, d'extrapoler les résultats de la relativité générale jusqu'à des distances arbitrairement petites, en particulier celles correspondant à une singularité. On sait même que l'on ne peut pas le faire à des échelles spatiales inférieures à la longueur de Planck (10^{-35} m). Cette échelle joue le rôle d'une sorte d'horizon microscopique. Sans savoir ce qui se passe exactement à ces dimensions, les physiciens estiment que la géométrie pourrait devenir elle-même sujette à des fluctuations quantiques, que la relativité ne permet pas de prendre en considération.

Or, selon les modèles de Big Bang, la reconstitution passée de l'évolution du facteur d'échelle de l'Univers (voir plus haut) mène à une valeur aussi petite que 10^{-35} m. Le moment correspondant de l'histoire cosmique est appelé « ère de Planck ». Il correspond à un instant t_p légèrement postérieur (de 10^{-43} seconde) à t_0 . Les valeurs de la température et de la densité étaient énormes, respectivement 10^{32} K et 10^{94} g/cm³. Dans des conditions si terribles, la relativité générale ne peut être appliquée, ne serait-ce que parce qu'elle est impuissante à prendre en compte les effets quantiques, pourtant prépondérants : aborder cette période nécessite impérativement une théorie de la gravitation quantique, ou du moins une théorie qui unifie les interactions fondamentales.

Notre physique ne permet donc pas de remonter l'histoire passée de l'Univers jusqu'au temps zéro. La validité de la reconstitution cosmique ne s'étend qu'entre aujourd'hui et t_p . Les tentatives d'imaginer les états antérieurs débouchent sur un flou quantique, si bien que l'histoire de l'Univers ne peut être considérée qu'à partir de l'ère de Planck. Ce n'est pas le « vrai » début de l'Univers, mais c'est le début de la période pendant laquelle nous sommes capables de le décrire et, dans une certaine mesure, de le comprendre. Cela ne change rien à la description ultérieure de l'évolution cosmique : que l'on remonte le passé d'aujourd'hui à t_p , ou bien (fictivement) jusqu'à

t_0 , cela n'engendre qu'une différence de 10^{-43} seconde, à comparer à une durée d'expansion de 14 milliards d'années.

La cosmologie quantique

On voudrait en dire davantage sur l'ère de Planck. Cette limite sur laquelle bute la physique, frontière de nos connaissances, implique que le cadre habituel de la variété espace-temps, continue, à quatre dimensions, éclate complètement.

L'idée de la gravité quantique, et de la nouvelle cosmologie qui en découlerait, est qu'au niveau microscopique, la géométrie de l'Univers pourrait être floue, comparable à une sorte d'écume constamment agitée de petites fluctuations. On pourrait la comparer à la surface d'un océan : vu d'avion, l'océan paraît lisse. D'une plus basse altitude, sa surface apparaît toujours continue, mais on commence à percevoir quelques mouvements qui l'agitent. Plongé dans l'océan, le nageur le voit tumultueux, discontinu même puisque des vagues se brisent, projetant des gouttes d'eau qui s'élèvent et retombent. De la même façon, l'espace-temps paraît continu à l'échelle humaine et même à celle des noyaux atomiques ; mais son « écume » pourrait devenir perceptible à l'échelle de Planck. Certaines de ses « gouttes » pourraient se manifester à nous sous forme de particules élémentaires.

Jusqu'à présent, aucune théorie complètement cohérente et calculable de gravité ou de cosmologie quantique n'est établie. Diverses descriptions préliminaires ont été tentées, dont certaines sont réellement fascinantes. La *géomérodynamique quantique* a été proposée par John Wheeler et Bryce de Witt à la fin des années 1960. Cette théorie voudrait traiter la géométrie de l'espace-temps de la même manière que la physique quantique ordinaire traite la matière.

Les premières versions de cosmologie quantique suggèrent qu'elle soit régie par une équation, dite de Wheeler-de Witt. Cette équation très complexe est inutilisable, en pratique, sous sa forme générale. La seule chance d'en trouver des solutions est de simplifier considérablement le problème. Par exemple, on peut se limiter à considérer une famille restreinte de géométries possibles, très simples, pour l'espace, comme celles à courbure constante : au lieu de considérer l'ensemble de toutes les configurations possibles, on n'en considère qu'une partie très restreinte. Il faut encore, pour cela, spécifier des conditions aux limites pour l'Univers. Celles-ci conditionnent le comportement spatio-temporel de la fonction d'onde de l'Univers, à peu près de la même façon que la trajectoire d'une particule en mécanique classique est spécifiée par sa position et sa vitesse initiales. Dans le cas de la cosmologie, cela soulève des

questions fondamentales qui sont loin d'être résolues. Divers types de suggestions ont été proposés, notamment par l'« école russe » (Andrei Linde et Alex Vilenkin) et par l'« école anglo-saxonne » (Jim Hartle et Stephen Hawking). En termes simples, le modèle quantique de Hartle et Hawking n'envisage que des géométries spatio-temporelles sans frontière ni bord – comme la surface d'une sphère, mais avec deux dimensions supplémentaires. Selon ces modèles, l'Univers serait fini non seulement dans l'espace (son volume total est fini) mais aussi dans le temps. La problématique singularité initiale disparaît alors. Plus exactement, elle se transforme en une simple singularité des coordonnées (comme le pôle Nord d'une sphère par exemple). Aucune violation des lois de la physique n'y apparaît. L'Univers n'aurait plus aucune frontière, ni spatiale ni temporelle. Il n'aurait pas eu de commencement et n'aura jamais de fin. Cette nouvelle « éternité du temps » n'est toutefois retrouvée qu'au prix de l'abandon du temps cosmique réel (mesuré par les horloges ou par l'expansion des galaxies) au profit d'un temps imaginaire (au sens mathématique du terme). Il resterait à proposer une interprétation satisfaisante de tout ceci, ce qui est loin d'être le cas.

La suggestion de Linde est très différente. Elle suppose des conditions initiales chaotiques. Qualitativement, la solution se présente sous la forme d'un gigantesque univers éternel et autoreproducteur, que l'on compare parfois à une « mousse de mini-univers ». Chacune des « bulles » de cette mousse aurait ses propres caractéristiques : constantes physiques, nombre de dimensions spatiales, dynamique, etc., ce qui permet de la considérer, de manière abusive, comme un « autre univers ». La totalité de notre univers observable (à distinguer de l'Univers dans sa totalité) serait constituée d'une infime partie de l'une de ces bulles seulement, qui aurait été démesurément gonflée par un processus ultra-efficace d'expansion, baptisé « inflation ». Chaque bulle individuelle – en particulier celle qui constituerait « notre univers » – pourrait naître et mourir. L'Univers « global », lui, n'aurait ni commencement ni fin.

Bien évidemment, une telle idée ne sera sans doute jamais vérifiable ni observable. On se situe ici aux frontières de l'approche scientifique, et sans doute déjà de l'autre côté.

D'autres approches de la gravité quantique existent, comme la théorie des supercordes, la théorie des boucles ou les géométries non commutatives. Certains modèles cosmologiques qui en découlent permettent d'éliminer la singularité initiale et d'envisager une ère « pré-Big Bang » pour l'histoire de l'Univers. Malgré tout, les diverses théories de cosmologie quantique soulèvent autant (sinon plus) de problèmes qu'elles n'en éclairent sur les débuts de l'Univers. Mais c'est ce qui fait leur richesse et leur intérêt. Résolvent-elles l'énigme du

temps zéro ? La réponse est ambiguë : oui selon certains modèles, non selon d'autres. L'incertitude résulte peut-être de la simplification exagérée imposée pour pouvoir résoudre les équations. Quoi qu'il en soit, les singularités devraient disparaître dans le cadre de la nouvelle vision unifiée que cherchent à construire les physiciens.

1- Extrait d'un article paru en octobre 2005 dans le magazine *La Recherche* (n° 390).

2- Voir l'article « Le récit du Big Bang », p. 109 [*Note ajoutée pour la présente édition*].

La fin de l'Univers : perspectives de l'astrophysicien¹

La perspective de la mort est mal vécue par notre société et par l'individu. Pour nous autres, astrophysiciens, qui traitons non pas des individus et des sociétés, mais des étoiles et du cosmos dans son ensemble, la perspective change du tout au tout, et c'est avec une sorte de joie sadique que nous nous employons à décrire les apocalypses célestes selon des degrés ascendants : d'abord la combustion de notre planète Terre, puis l'extinction de notre Soleil, la désagrégation de notre galaxie et enfin, l'embrasement ou le refroidissement final de l'Univers tout entier.

Une telle délectation eschatologique provient du fait que ce type de projection dans le futur nous permet d'éprouver la puissance prédictive de nos modèles. D'ordinaire, les astrophysiciens convient leurs auditeurs à un voyage dans le passé : l'information électromagnétique qui nous parvient de lointaines régions de l'espace nous renseigne en effet sur l'histoire passée de l'Univers et des astres qu'il contient. Au XX^e siècle, les remarquables progrès de l'astrophysique et de la cosmologie ont permis d'établir des modèles généraux d'évolution des corps célestes, aussi bien à l'échelle des systèmes planétaires, stellaires et galactiques qu'à l'échelle du cosmos.

C'est la raison pour laquelle je vous confie à un voyage vers le futur. Voyage incertain, bien sûr, d'autant plus incertain que nous nous projeterons loin de l'époque présente. Mais un voyage qui, je l'espère, ouvrira quelques pistes de réflexion sur les fins du monde.

La mort de la Terre

Pour l'astrophysicien, il y a de petites et de grandes apocalypses célestes. La « petite » apocalypse concerne notre seule planète. Elle peut se décliner entre le très court et le long terme.

Sur une échelle de l'ordre du siècle, l'environnement planétaire est menacé, soit par des phénomènes naturels (variabilité de l'activité solaire), soit par la pollution due à l'activité humaine (déperdition de la couche d'ozone, augmentation des gaz à effet de serre). Des

simulations numériques ont révélé que la seule augmentation en CO₂ dans l'atmosphère terrestre due à un siècle d'industrialisation aura de profondes répercussions sur le climat terrestre pendant cinquante mille ans, même si toute activité industrielle cessait aujourd'hui même.

À moyen terme, entre quelques milliers et quelques millions d'années, les glaciations, le volcanisme ou les collisions avec des comètes et des astéroïdes peuvent également gravement perturber, sinon éradiquer, le développement de la vie sur Terre. Il en a déjà été ainsi dans le passé, comme en témoignent plusieurs extinctions massives d'espèces attribuées soit à des phases de volcanisme exacerbé, soit à des impacts de météorites de plus de 10 kilomètres de diamètre, ou encore à une combinaison des deux. La dernière catastrophe planétaire en date a eu lieu il y a 65 millions d'années, à la frontière entre les ères crétacé et tertiaire, qui marqua notamment l'extinction soudaine des grands sauriens. Un cratère d'impact météoritique datant de cette époque a été retrouvé dans le golfe du Mexique. Le diagramme 1 donne les corrélations entre le nombre estimé d'astéroïdes du système solaire d'une taille donnée (entre 10 mètres et 10 kilomètres) et l'intervalle de temps moyen entre deux collisions avec notre planète. Un événement du type crétacé-tertiaire, impliquant un corps de 10 kilomètres, ne peut se produire en moyenne que tous les cent millions d'années, tandis qu'un événement plus modeste, tel que l'explosion de la Tunguska en 1908 (corps de 30 mètres) se produit en moyenne tous les mille ans. Le diagramme inférieur indique la puissance explosive correspondante et le nombre potentiel de victimes de tels impacts. C'est à partir d'un corps de 1 kilomètre de diamètre que l'impact induit une catastrophe d'échelle planétaire.

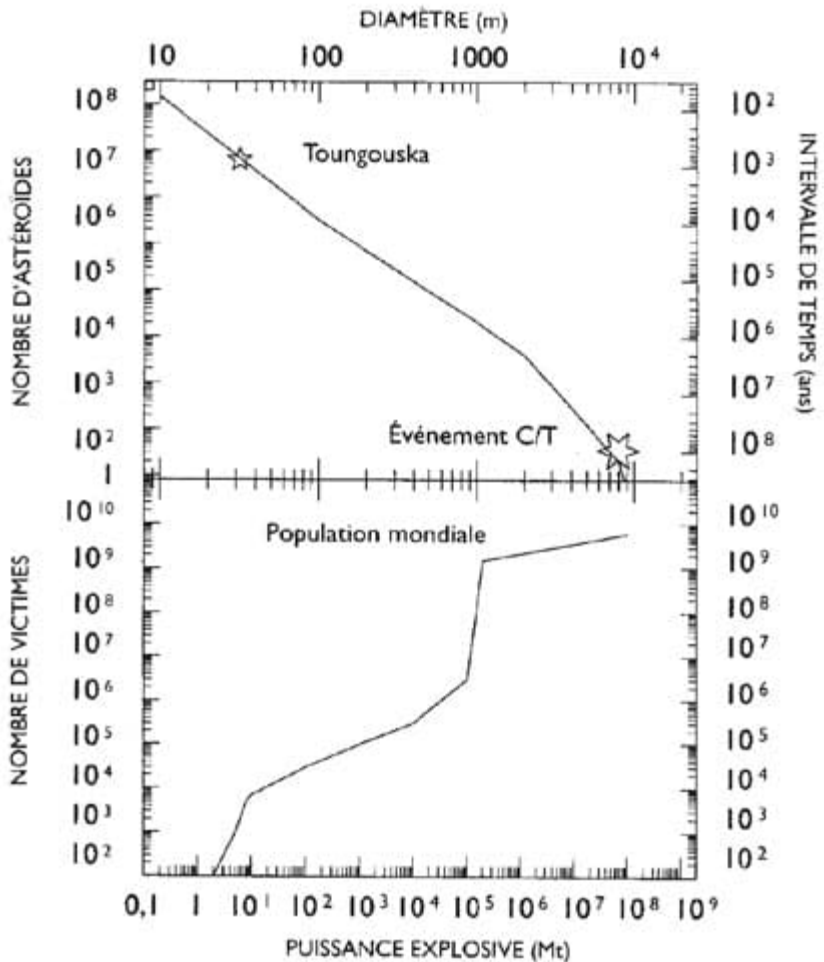


Diagramme 1

À beaucoup plus long terme (5 milliards d'années), le destin de notre planète est lié à celui du Soleil. Ayant épuisé ses réserves de combustible hydrogène qui la font actuellement briller de manière stable, notre étoile se mettra à gonfler pour se transformer en « géante rouge » et englobera les planètes intérieures du système solaire. Le diagramme 2 donne les évolutions en luminosité et en rayon de notre Soleil sur une échelle de 12 milliards d'années. L'engloutissement des trois planètes les plus proches, Mercure, Vénus et la Terre, semble inévitable. Cette phase d'expansion sera suivie d'une phase de rétraction, où le cadavre inerte du Soleil se réduira aux dimensions d'une « naine blanche ».

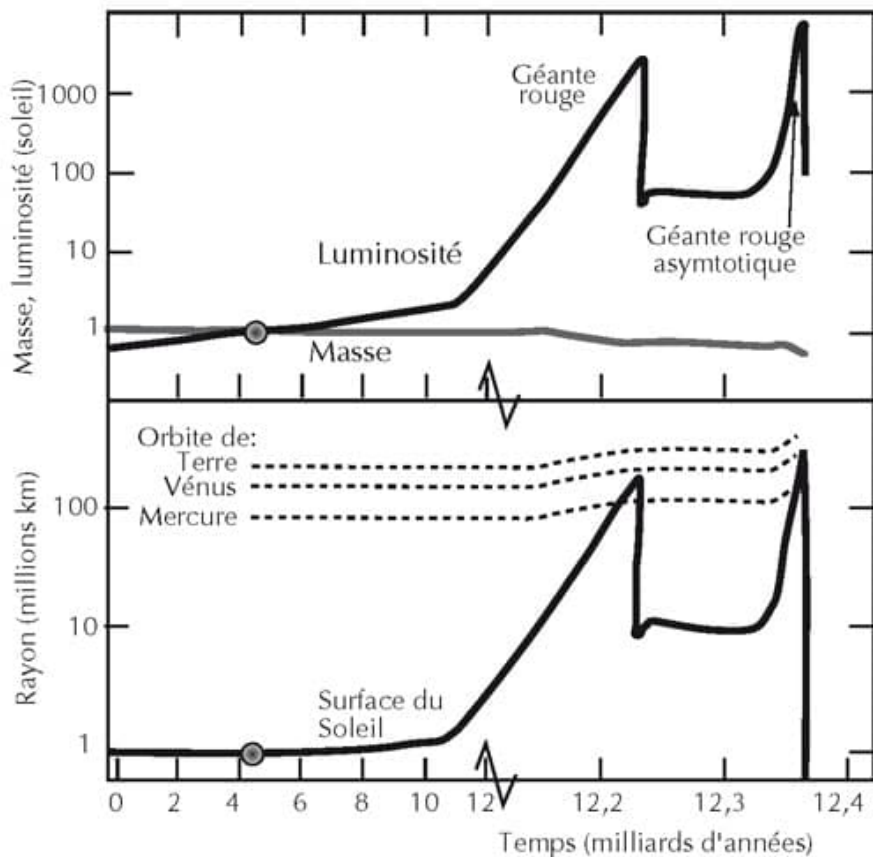


Diagramme 2

Les futurs de l'Univers

L'Univers est rempli de corps massifs – étoiles, galaxies – qui exercent les uns sur les autres une attraction gravitationnelle. Il y a donc compétition entre l'expansion et la contraction gravitationnelle. Savoir si l'expansion sera un jour vaincue par les forces d'attraction est une question essentielle, dont dépend le destin global de l'Univers. Dans le cadre de la relativité générale et des modèles de Big Bang qui en découlent, la réponse repose sur une quantité théorique, la *densité critique* de l'Univers, égale 10^{-29} g/cm^3 (l'équivalent de trois atomes d'hydrogène par mètre cube d'espace).

Si la densité moyenne actuelle de matière est inférieure à la valeur critique, l'Univers est ouvert, c'est-à-dire qu'il se dilatera indéfiniment, devenant toujours plus froid, toujours plus vide et toujours plus sombre. Au contraire, si la densité actuelle dépasse la valeur critique, alors la gravitation triomphera. L'Univers est fermé, c'est-à-dire qu'il cessera un jour de se dilater, il se contractera et

implosera en un phénomène ressemblant à un Big Bang à l'envers, le Big Crunch (diagramme 3).

À partir de ces deux évolutions possibles², on peut écrire des scénarios décrivant les différentes étapes du destin cosmique : mort lente, froide et sombre d'un côté, ou bien mort violente, chaude et éblouissante.

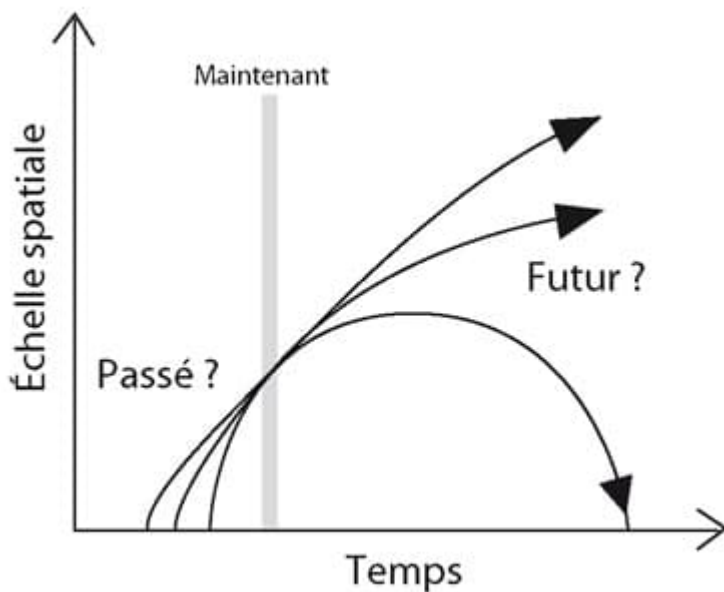


Diagramme 3.

Les modèles de Big Bang selon la théorie de la relativité générale.

1. La longue nuit : Du Big Bang au Zéro absolu

Les mesures actuelles indiquent plutôt que la densité moyenne actuelle de l'Univers est inférieure à la densité critique, et donc que l'expansion se poursuivra à jamais.

Le destin à long terme de la matière dans l'Univers dépend de certaines hypothèses sur lesquelles travaillent les physiciens des particules, notamment sur le temps de vie du proton³.

Voici brièvement les chronologies possibles dans les diverses hypothèses.

Si le proton est éternel :

- « **Temps zéro** » : Big Bang.
- **10 milliards d'années** : aujourd'hui (Univers en expansion).
- **Dans 3 milliards d'années** : collision de notre galaxie avec la galaxie voisine, le Grand Nuage de Magellan.
- **Dans 3,7 milliards d'années** : collision avec la galaxie

d'Andromède.

- **Dans 5 milliards** : mort du Soleil.

- **10^{12} années** : toutes les étoiles de l'Univers s'éteignent. L'alchimie stellaire, créatrice d'éléments lourds, s'arrête. L'Univers est un immense désert jonché des débris épars de galaxies, d'étoiles éteintes (trous noirs, naines noires, étoiles à neutrons), de planètes et d'astéroïdes. Les étendues sont encore parcourues par de faibles rayonnements infrarouges.

- **10^{18} années** : les galaxies se sont évaporées, à l'exception d'un grand trou noir central. Une activité épisodique de quasar est possible, due à l'absorption d'étoiles mortes par des trous noirs géants.

- **10^{27} années** : les amas de galaxies se transforment en trous noirs galactiques et hypergalactiques. Ne restent plus que trous noirs et divers débris (étoiles naines, planètes, astéroïdes)

- **10^{65} années** : les trous noirs stellaires s'évaporent en illuminant brièvement la longue nuit.

- **10^{100} années** : tous les trous noirs, même géants, se sont évaporés.

Ne restent qu'étoiles à neutrons, naines noires, planètes, météorites. La température cosmique est 10^{-60} K.

- **10^{1500} années** : « Âge du fer ». Toute la matière est transformée en sphères de fer, sauf les étoiles à neutrons (plus stables).

- **Âge des neutrons** : le fer se convertit en neutrons.

- **Âge des trous noirs** : les étoiles à neutrons se convertissent en trous noirs au bout de dix puissance dix puissance 76 années – un nombre si grand que tous les livres du monde écrits depuis l'aube de l'humanité ne suffiraient pas à l'écrire.

- **Les trous noirs s'évaporent.** Tout finit en lumière froide.

Si le proton se désintègre :

- **10^{35} années** : le destin de l'Univers bifurque après la formation des trous noirs galactiques et hypergalactiques : tous les protons se désintègrent. Les étoiles se sont évaporées avec les protons, il ne reste qu'un océan dilué d'électrons, positrons, neutrinos et photons – et de trous noirs.

La distance moyenne entre les particules dépasse la taille actuelle du système solaire (10 milliards de kilomètres).

- **10^{75} années** : les paires électron-positron s'associent en « positronium », chacun ayant la taille de l'univers aujourd'hui observable (20 milliards d'années-lumière).

- **10^{124} années** : le positronium se désintègre en photons, la plupart des trous noirs ont aussi disparu. Il ne reste plus qu'un fond résiduel de photons et de particules éternelles telles qu'électrons,

positrons et neutrinos, le tout à une température tendant vers le zéro absolu.

2. Du Big Bang au Big Crunch : Un brasier infernal

Le temps qu'il faudra au cosmos pour arrêter son expansion et commencer à se contracter dépend de sa densité (au-dessus de la valeur critique). Par exemple, si elle est égale à deux fois la valeur critique, l'expansion devrait se poursuivre pendant encore 50 milliards d'années, le cycle complet d'expansion-contraction durant donc 120 milliards d'années.

- **« Temps zéro »** : Big Bang.

- **10 milliards d'années** : aujourd'hui (Univers en expansion).

- **60 milliards d'années** : fin de l'expansion, inversion du mouvement cosmique. L'Univers a quadruplé sa taille. Les étoiles de type solaire se sont transformées en naines blanches ou noires, les étoiles plus massives en étoiles à neutrons et en trous noirs. Pendant la recontraction, l'Univers passe par les mêmes stades que l'expansion mais selon un processus inverse, avec toutefois une énorme différence : les étoiles mortes ne se rallument pas.

- **110 milliards d'années** : l'Univers a retrouvé ses dimensions (20 milliards d'années-lumière) et sa température d'aujourd'hui (-270°C).

- **1 milliard d'années avant la fin** : les amas de galaxies (constitués d'étoiles mortes et de trous noirs géants) fusionnent en un amas unique.

- **100 millions d'années avant la fin** : les galaxies fusionnent.

- **100 000 ans avant la fin** : l'Univers devient opaque. Le rayonnement de fond atteint plusieurs milliers de degrés, les corps froids (planètes) sont vaporisés, les trous noirs géants engloutissent les résidus stellaires.

- **Une seconde avant la fin** : l'Univers mesure 10 années-lumière, la température est de 10 milliards de degrés, les atomes se brisent en particules élémentaires.

- **Une fraction de milliardième de seconde avant la fin** : les particules se désintègrent en quarks, les interactions fondamentales commencent à se combiner entre elles.

- **10^{-43} seconde avant le Big Crunch** : la gravité se combine aux autres forces, l'espace-temps devient quantique et plus aucune prédiction n'est possible. En particulier, on ne sait pas si l'Univers disparaît dans une « singularité » ou s'il rebondit pour donner naissance à un nouvel univers, tel un « phénix ».

L'avenir de l'intelligence

En déroulant ces perspectives cosmiques sur les fins du monde physique, on a l'impression que le sort de l'espèce humaine est tellement localisé dans le temps et dans l'espace qu'il ne présente aucun intérêt, ou tout au moins que la fin inéluctable de l'espèce humaine en tant que telle n'a aucune influence sur la fin des mondes cosmiques. Au contraire, c'est l'embrasement inévitable de notre planète, l'extinction inévitable de notre étoile, la désagrégation inévitable de la matière organique, qui scellent à plus ou moins brève échéance le destin de l'espèce humaine.

C'est sans doute ce qu'a voulu exprimer le philosophe Bertrand Russell à la fin du XIX^e siècle, à l'heure où triomphait la seconde loi de la thermodynamique assurant que tout système physique est inéluctablement voué à la dégradation de l'énergie, la croissance de l'entropie et de la désorganisation : « Que tous les travaux du passé, toute la dévotion, toute l'inspiration, tout le génie humain sont voués à l'extinction, que le temple des exploits de l'Homme est condamné à l'enterrement sous les débris de l'Univers en ruines – toutes ces choses sont maintenant si certaines qu'aucun système philosophique ne peut les ignorer. »

Mais un tel pessimisme « réaliste » est-il vraiment de mise ? Les scénarios eschatologiques, qu'ils soient d'ordre scientifique, philosophique ou religieux, sont des sécrétions de la pensée humaine, et sont donc fondamentalement anthropomorphes. C'est la raison pour laquelle certains penseurs et futurologues du XX^e siècle ont voulu élargir le débat en s'interrogeant sur une possible survie à très long terme, non pas de l'espèce humaine, mais de ce qui semble être son essence même, à savoir la conscience et l'intelligence.

L'intelligence peut-elle trouver les moyens de survivre au-delà de ses supports traditionnels, à savoir un socle ferme tel qu'une planète, une source d'énergie telle que le Soleil, une infrastructure matérielle telle que les molécules organiques ? Certains futurologues ont commencé à envisager des scénarios d'astro-ingénierie : « terraformation » (modification des surfaces de planètes hostiles à la vie de façon à les rendre habitables), récupération à grande échelle de l'énergie des étoiles ou des trous noirs, rallumage d'étoiles en voie d'extinction, etc. Certains, comme Desmond Bernal, Fred Hoyle ou Freeman Dyson, sont même allés jusqu'à imaginer des intelligences dématérialisées, sans cesse en train de s'adapter aux conditions d'un univers en refroidissement perpétuel. Dyson a ainsi déclaré : « Aussi loin que nous allons dans le futur, nous trouverons toujours de nouveaux événements se dérouler, de nouveaux mondes à explorer, de nouvelles informations arriver, un domaine toujours en expansion

pour la vie, la conscience et la mémoire ... un Univers de richesse et de complexité sans limite, d'une vie éternelle. »

Russell ou Dyson ? Seule l'éternité pourra le dire !

1- Conférence donnée le 14 octobre 1999 au colloque « Les fins du monde », XXVI^e congrès de la Société de thanatologie, Paris, La Sorbonne.

2- La découverte, au début des années 2000, de l'accélération cosmique (due à une forme prépondérante d'énergie dite « sombre » dont la propriété caractéristique est d'être répulsive) induit un troisième scénario non décrit ici, « du Big Bang au Big Rip », que le lecteur intéressé trouvera dans le dernier chapitre de mon ouvrage *Le Destin de l'Univers*, op. cit. [Note ajoutée pour la présente édition].

3- Les expériences qui ont été effectuées depuis lors au détecteur Kamiokande (Japon) montrent que le proton a une demi-vie (temps au bout duquel une quantité donnée de protons serait diminuée de moitié par désintégration) supérieure à 10^{35} années, ce qui contraint fortement les théories prônant l'instabilité du proton [Note ajoutée pour la présente édition].

La mort des étoiles¹

Les rêveurs d'apocalypses, mages, astrologues, prophètes, poètes et écrivains, ont envisagé toutes les formes de mort céleste : choc, désintégration, glaciation, déluge, explosion, embrasement. Ils ont en outre spéculé sur l'ampleur de la catastrophe. S'agit-il d'une fin totale, ou seulement de catastrophes limitées ? D'une mort définitive, ou préluant à une renaissance ? Les données de l'astrophysique moderne sont venues enrichir ces données de l'imaginaire. Au contraire des astrologues, les astrophysiciens sont accoutumés à survoler de très haut les destinées terrestres. Pour eux qui traitent non pas des individus et des sociétés, mais des étoiles et du cosmos, la perspective change du tout au tout, et c'est avec l'excitation de la découverte qu'ils s'emploient à décrire les apocalypses célestes selon des degrés ascendants : la combustion de notre planète Terre, l'extinction de notre Soleil, l'explosion des étoiles, la désagrégation de notre galaxie et enfin, le refroidissement final de l'Univers tout entier.

La mort d'une étoile

Les modèles d'évolution stellaire se sont développés à partir des années 1930, dès lors que la source d'énergie interne des étoiles, l'énergie nucléaire, était identifiée. Les nouvelles apocalypses célestes imaginées par la science astrophysique et confirmées par l'observation, engendrent toujours « morts » et « renaissances ». En résumé : à la fin de leur vie de lumière, quand les réactions thermonucléaires s'éteignent, le cœur d'une étoile s'effondre sous sa propre gravité et forme un résidu compact, tandis que l'enveloppe gazeuse est éjectée dans l'espace. Les débris gazeux ensemencent en noyaux atomiques lourds les espaces interstellaires, engendrant de proche en proche de nouvelles naissances stellaires qui accueillent en leur sein les ferments d'étoiles disparues. Cette belle image du bûcher fécond rappelle certains mythes anciens tels que celui de l'*ekpyrosis*. Quant au résidu central, il enfante un cadavre stellaire : naine blanche, étoile à neutrons ou trou noir. Ces astres, sombres mais eux aussi promis, sous certaines conditions, à métamorphoses et résurrections passagères, sont amenés à jouer un rôle capital dans

l'évolution du cosmos à très long terme.

Trois cas sont possibles :

- Pour les étoiles moins massives que 10 masses solaires (environ 90 % des étoiles), l'enveloppe gazeuse se dissout en une nébuleuse planétaire, et le cœur forme un résidu compact appelé naine blanche.

- Pour les étoiles de masse initiale comprise entre 10 et 40 masses solaires (environ 9,9 % des étoiles), il y a explosion violente de l'enveloppe, appelée supernova, et formation au centre d'une étoile à neutrons.

- Les étoiles au-dessus de 40 masses solaires (environ 0,1 % des étoiles) explosent en « hypernova » et forment un trou noir.

Avant d'examiner tour à tour chacune de ces trois possibilités plus en détail, commençons par rappeler les processus essentiels de l'évolution stellaire. Nous savons qu'une étoile est une sphère de gaz chaud dont la cohésion résulte de l'attraction gravitationnelle, qui tend à rapprocher le plus possible les particules les unes des autres. L'étoile ne s'effondre pas sur elle-même car partout la pression du gaz équilibre l'action de la gravité. Pour que cet équilibre soit stable, il faut que la pression augmente régulièrement avec la profondeur, de sorte que chaque couche pesante soit en équilibre entre une couche plus comprimée et une autre qui l'est moins. Ainsi, la matière stellaire, comprimée par la masse des couches qui la surplombent, est d'autant plus chaude que sa profondeur est grande. Selon les étoiles, la température centrale varie d'une dizaine de millions à quelques centaines de millions de degrés, alors que la surface atteint des températures comprises entre quelques milliers et quelques dizaines de milliers de degrés. Ce déséquilibre de température engendre un transfert d'énergie qui prélève l'excès d'énergie thermique de la région chaude pour le céder à la région froide. Cette évolution, qui tend normalement à uniformiser la température, est tenue en échec par le jeu de la gravité de l'étoile qui accentue les différences de température d'autant plus que le transport d'énergie du centre vers la surface est plus grand. En surface, ce flux d'énergie s'échappe puis se dilue sous forme de rayonnement : l'étoile brille. Pendant la majeure partie de son évolution, l'étoile s'accommode de cette hémorragie d'énergie en puisant dans ses ressources d'énergie nucléaire. Dans les régions centrales, plus denses et plus chaudes, des réactions de fusion transforment des noyaux légers, comme l'hydrogène, en noyaux plus lourds, comme l'hélium, et libèrent de l'énergie qui compense celle qui s'échappe par la surface. L'épuisement des ressources nucléaires déclenche la contraction gravitationnelle du cœur de l'étoile, et l'échauffement qui en résulte permet le démarrage d'un nouveau cycle de fusion qui brûle les cendres du précédent. Corrélativement, l'enveloppe stellaire se dilate et l'étoile entre dans la phase de géante

rouge. Le Soleil atteindra ce stade dans quelque 5 milliards d'années. Son rayon aura alors centuplé, et la Terre sera devenue une fournaise.

Après la combustion de l'hélium en couches, de nouvelles réactions nucléaires se déclenchent au cœur de l'étoile, et celle-ci connaît une phase d'instabilité dont l'issue est liée à sa masse.

Nébuleuses planétaires et naines blanches

Pour les étoiles les plus communes, comme notre Soleil, les réactions nucléaires s'arrêtent quand le carbone et l'oxygène sont formés. Le cœur de l'étoile se contracte lentement sous l'effet de la gravité. Au bout d'environ cent mille ans, il forme une naine blanche, étoile de très petit rayon, de l'ordre de celui de la Terre, mais pour une masse voisine de celle du Soleil, ce qui lui confère une densité très élevée, de l'ordre de la tonne par centimètre cube. La matière y est « dégénérée », c'est-à-dire réduite à un gaz de particules où la pression usuelle, due à l'agitation thermique, est négligeable devant la pression d'origine quantique. En se refroidissant, une naine blanche devient noire. Étant composée essentiellement de carbone cristallisé, la naine noire finit par se transformer en diamant, mais le processus est si lent qu'aucune naine noire ne s'est encore formée depuis la naissance de l'Univers, voici 15 milliards d'années (alors que l'on observe déjà de très nombreuses naines blanches).

Quant au vestige gazeux de l'étoile, c'est une coquille de gaz en expansion qui se dilue dans le milieu interstellaire. Son apparence en forme d'anneau entourant un objet central brillant lui vaut l'appellation trompeuse de « nébuleuse planétaire », bien que le phénomène n'ait rien à voir avec les planètes. Cette nébuleuse, enrichie en carbone et oxygène, peut être « recyclée » dans d'autres étoiles qui naîtront ultérieurement.

Supernovæ et étoiles à neutrons

Les étoiles dont la masse est supérieure à environ dix fois celle de notre Soleil entretiennent la fusion de l'hydrogène en hélium pendant environ vingt millions d'années, nettement moins longtemps qu'une étoile comme le Soleil dont la durée de vie se compte en milliards d'années.

À la fin de cette période, l'épuisement de l'hydrogène au cœur de l'étoile déclenche une contraction gravitationnelle qui ne s'arrêtera que lorsque la température est suffisamment élevée pour amorcer la fusion de l'hélium en carbone et en oxygène ; notons que l'hydrogène continue sa fusion dans une couche entourant le cœur. Après environ un million d'années, l'hélium s'épuise à son tour et la contraction du cœur permet la fusion du carbone en néon, sodium et magnésium qui

durera dix mille ans. Suivront ensuite la fusion du néon en oxygène et magnésium (qui durera à peu près douze ans), puis la fusion de l'oxygène en silicium et soufre (pendant quatre ans) et finalement une semaine suffit à transformer le silicium en fer. La durée des phases successives s'amenuise car l'élévation de température accélère le rythme des réactions.

Entre-temps, l'étoile s'est dilatée en une supergéante rouge, dont le rayon atteint plusieurs milliards de kilomètres. Les réactions nucléaires s'arrêtent quand le cœur de l'étoile s'est transformé en fer. À l'arrivée au fer, l'évolution de l'étoile s'engage dans une voie radicalement nouvelle car ce noyau atomique est énergétiquement stérile. L'apparition du fer marque le début d'un processus qui aboutit à la destruction de l'étoile. Une fois le silicium épuisé, la contraction du cœur reprend puisque aucune nouvelle réaction ne vient compenser l'hémorragie permanente que subit l'étoile. Mais cette fois, la température est si forte (égale à quelques milliards de degrés) que les photons de lumière, très énergétiques, peuvent briser les noyaux de fer. Cette disparition d'énergie radiative précipite l'effondrement du cœur, attisée par la capture des électrons par les noyaux qui transforme les protons en neutrons. Cette réaction nucléaire s'accompagne d'une émission de particules qui interagissent très faiblement avec la matière : les neutrinos. Ceux-ci s'échappent de l'étoile en emportant la phénoménale quantité d'énergie potentielle gravitationnelle dégagée par la contraction. En quelques dixièmes de seconde, la matière atteint l'incroyable densité d'un milliard de tonnes par centimètre cube, l'équivalent de la compression d'une petite montagne dans un dé à coudre ! Le cœur de l'étoile, désormais constitué de neutrons, se réduit à une petite sphère d'une dizaine de kilomètres de diamètre : une étoile à neutrons vient de se former. Le reste de l'étoile en effondrement vient s'écraser sur la surface rigide de l'étoile à neutrons à une vitesse de plusieurs milliers de kilomètres par seconde. La violente compression qui en résulte produit une onde de choc qui remonte à travers les couches externes de l'étoile. Son passage chauffe la matière à des températures supérieures au milliard de degrés et provoque des réactions de fusion qui produisent des éléments lourds, notamment du nickel et du cobalt radioactifs qui, plus tard, se désintègreront en fer. Quand l'onde de choc atteint la surface de l'étoile, la température s'élève brutalement et l'étoile entière explose, à des vitesses pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par seconde. Cet événement explosif, appelé supernova de type II, marque la mort d'une étoile massive et son influence sur le milieu interstellaire se fera sentir pendant des millions d'années.

Notons qu'il existe également des supernovæ de type I, résultant

de l'évolution d'un système d'étoiles double dont l'une des composantes est une naine blanche, à la surface de laquelle une couche de gaz comprimé explose.

L'explosion d'une supernova est cataclysmique ; pendant quelque temps, la supernova a une luminosité extraordinaire dans le spectre visible qui rivalise avec celle d'une galaxie entière ! Et encore, cette partie visible ne représente que la dix millième partie de l'énergie emportée par les fantomatiques particules que sont les neutrinos.

Le phénomène est cependant rare : en moyenne, trois par siècle dans une galaxie. Près de chez nous, la supernova du Crabe a été observée par les Chinois en l'an 1054 et nous montre encore aujourd'hui une splendide nébuleuse en expansion, véritable bombe thermonucléaire dans l'espace.

Le vestige gazeux de la supernova agit comme un bulldozer, en entrant en collision avec les nuages de gaz du milieu interstellaire et en déclenchant de nouvelles naissances stellaires, et comme un fécondateur, en apportant tous les éléments chimiques qu'elle a formés.

Nous sommes donc faits de poussières d'étoiles, puisque tous les éléments qui nous composent (à l'exception de l'hydrogène) ont été formés dans des étoiles disparues depuis plus de 5 milliards d'années.

Le cadavre de la supernova – l'étoile à neutrons – est une sorte de noyau atomique géant, parce que les protons qui le composent se sont compactés entre eux en intégrant leurs électrons. La densité est gigantesque : quelques masses solaires concentrées dans une sphère de 15 kilomètres de diamètre correspondent à 1 milliard de tonnes par centimètre cube. Ce type de matière neutronique dégénérée n'existe pas sur Terre.

Certaines étoiles à neutrons se manifestent à l'observation sous forme de pulsars, pour deux raisons. Tout d'abord, le moment angulaire étant conservé, la vitesse de rotation s'accélère quand l'étoile se contracte (à l'exemple de la patineuse qui tourne sur elle-même en repliant ses bras). L'étoile à neutrons peut ainsi tourner jusqu'à plusieurs centaines de fois par seconde. Ensuite, son champ magnétique augmente aussi plusieurs milliards de fois. Au-dessus des pôles magnétiques de l'étoile, les lignes de champ intenses capturent alors les particules électrisées et les font rayonner dans le domaine radio. L'étoile se comporte comme un phare cosmique : nos radiotélescopes le captent chaque fois que le faisceau du phare passe dans l'axe de la Terre. À cause de cette pulsation très régulière, certaines étoiles à neutrons ont été détectées sous forme de pulsars. Par exemple, le pulsar du Crabe clignote trente-trois fois par seconde.

Lors de la découverte de ces objets extraordinaires, en 1967, certains astronomes ont d'abord cru qu'il s'agissait de signaux

artificiels émis par des intelligences extraterrestres, car la régularité de la pulsation paraissait surnaturelle : les premiers pulsars furent provisoirement appelés LGM 1, LGM 2, etc., pour « Little Green Man », « Petit homme vert » !

On connaît aujourd'hui plus de mille pulsars. Ces métronomes cosmiques ont même été utilisés dans des compositions musicales. Mais peu à peu, un pulsar perd de l'énergie, ralentit, son champ magnétique diminue, et son phare finit par s'éteindre.

Hypernovæ et trous noirs

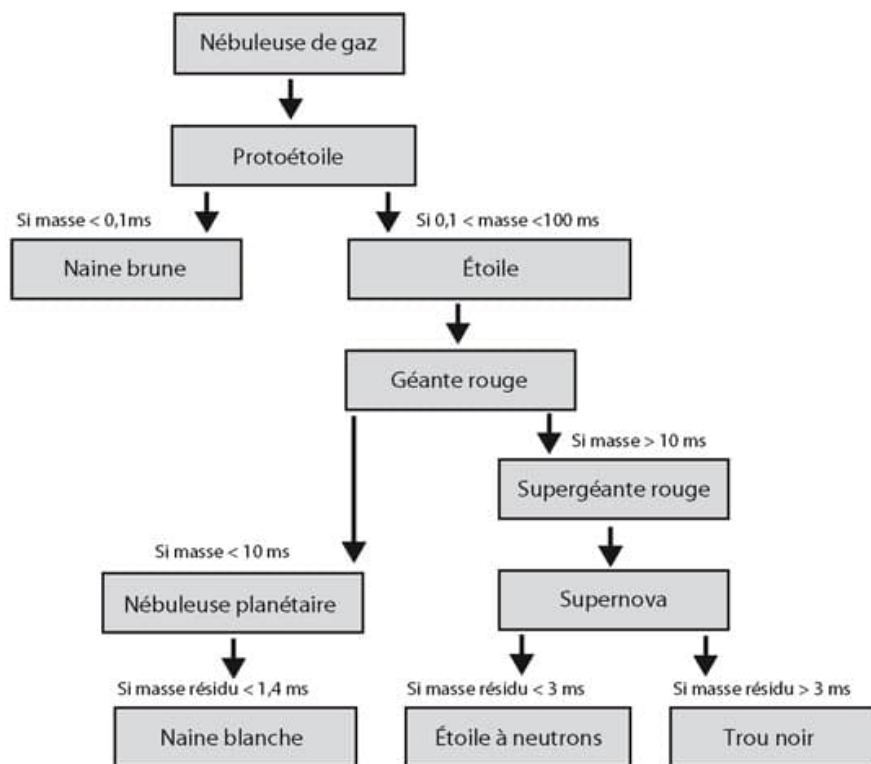
Les supernovæ laissent filtrer, après quelques mois d'expansion, des rayons gamma, traces de la nucléosynthèse explosive qui s'est déroulée dans leur enveloppe. Au cours des dernières années, des satellites astronomiques ont observé d'autres sources de rayons gamma, gigantesques bouffées appelées « sursauts gamma », en provenance de toutes les directions du ciel. L'énergie impliquée dépasse de loin celle d'une supernova : elle est comparable à l'énergie récupérée si toute la masse du Soleil était convertie en rayonnement, en vertu de la fameuse loi $E = mc^2$. Comprendre le phénomène des sursauts gamma nécessite donc d'expliquer comment, en quelques secondes, une fraction appréciable d'une étoile comme le Soleil peut se volatiliser sous forme de rayons gamma.

Quel pourrait être le mécanisme du phénomène ? Le sursaut lui-même est modélisé en termes d'interaction d'un jet de matière, se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, avec le milieu environnant. L'échauffement considérable qui en résulte serait la cause de l'émission de photons de grande énergie. L'origine de ce jet est encore largement débattue, mais le modèle en vogue invoque un trou noir de quelques masses solaires attirant rapidement la matière qui l'entoure sous forme d'un disque.

Quelle pourrait être l'origine de ce trou noir ? Il semble qu'il faille invoquer un phénomène explosif encore plus énergétique qu'une supernova, que la nomenclature actuelle désigne sous le nom d'« hypernova ». En effet, dans les étoiles très massives, de masse supérieure à environ quarante fois la masse du Soleil, le cœur peut s'effondrer directement en trou noir sans émission de neutrinos et sans passer par le stade intermédiaire d'étoile à neutrons. C'est le ralentissement soudain du trou noir en rotation rapide, liée à l'absorption progressive de l'enveloppe, qui libérerait la prodigieuse quantité d'énergie observée comme un sursaut gamma.

L'existence des hypernovæ est encore controversée, mais des indices peuvent être trouvés. L'explosion d'une hypernova dégage une telle quantité d'énergie qu'elle crée un « trou » dans le milieu

interstellaire environnant. Des calculs montrent qu'en un million d'années la cavité creusée par l'explosion pourrait atteindre un rayon de 200 à 500 années-lumière. Un vide qui devrait être observable... Une recherche de telles cavités a permis de sélectionner quelques candidats dans des galaxies extérieures à la nôtre.



Évolution d'une étoile. Tableau récapitulatif.

Au cours de sa vie, une étoile passe par différents stades. Cette évolution se fait en fonction de sa masse initiale, qui provoque ou non certaines réactions internes, lesquelles conduisent l'étoile à grossir, puis à s'effondrer sur elle-même.

Les trous noirs, quant à eux, semblent bien exister en abondance dans la nature. Bien que non décelables par leur rayonnement, ils peuvent être détectés par les effets gravitationnels qu'ils exercent sur les astres voisins. Ainsi, l'analyse du mouvement périodique de certaines étoiles a fourni quelques exemples où il s'agit d'un système binaire dont l'une des composantes est un résidu compact entouré d'un disque de gaz chaud, émettant des bouffées de rayonnement X – signant ainsi la présence d'un trou noir.

Si les trous noirs apparaissent comme le stade ultime de l'évolution des étoiles très massives, résultant de la contraction gravitationnelle indéfinie du noyau, ils ne peuvent être réellement compris que dans le cadre de la théorie de la relativité générale

Mort et transfiguration

L'Univers a donc subi, à différentes époques et à différents endroits, des cataclysmes dégageant une énergie si considérable qu'aucun mot ne peut les qualifier. Il est acquis que ces processus, d'une violence capable de détruire toute vie sur plusieurs années-lumière, sont au contraire indispensables à la formation de la matière qui nous entoure, et par là même à la vie telle que nous la connaissons. Les processus violents et destructeurs sont omniprésents. À des échelles de taille plus grandes que celle des supernovæ, on trouve les quasars, les noyaux de galaxies actives et les collisions entre galaxies. À des échelles plus modestes, l'impact entre la Terre et un astéroïde de bonne taille pourrait bien mettre fin à l'aventure humaine commencée il y a déjà un bon million d'années.

Ces processus violents ont joué un rôle déterminant dans le façonnage de notre univers actuel. Les éléments lourds n'existent que grâce aux étoiles, et ne peuvent se répandre dans une galaxie que grâce aux explosions de supernovæ. De nombreuses observations montrent aussi que les étoiles naissent à la suite d'événements violents : l'onde de choc, consécutive à l'explosion d'une supernova ou à la collision entre deux galaxies, déclenche l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz dans lequel naîtront des étoiles.

Il a déjà été dit que nous étions constitués de poussières d'étoiles. Les atomes de nos corps ont été forgés il y a bien longtemps dans la fournaise des supernovæ. Nous avons bénéficié des effets conjugués des étoiles de grande masse antérieures au Soleil, qui sont à l'origine des éléments chimiques dont nous sommes constitués, et de la faiblesse de la masse du Soleil qui lui permet d'avoir une évolution très lente laissant à la vie de temps d'apparaître. Ces étoiles pourraient bien avoir été formées grâce à des collisions de galaxies à des époques très précoces de notre univers. Le monde des « étoiles fixes » et immuables qu'imaginaient les astronomes du Moyen Âge aurait certainement été vide de toute vie car il ne réunissait pas les conditions nécessaires à l'apparition des éléments chimiques nécessaires à son développement. L'univers violent que l'astronomie moderne nous fait découvrir a produit au contraire une vie riche et variée, au moins de ce côté-ci d'une galaxie moyenne, sur une petite planète bleue tournant autour d'un soleil jaune très quelconque.

La fin de l'Univers

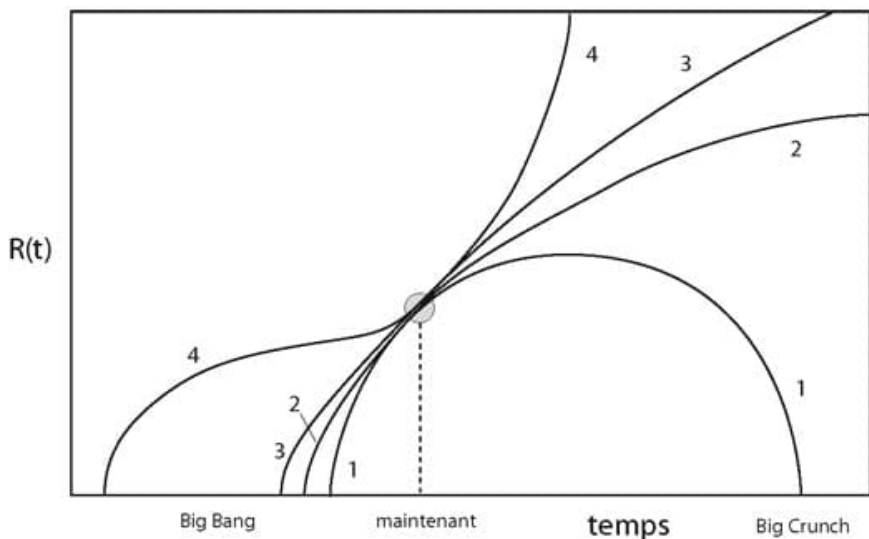
Qu'en est-il de l'Univers lui-même ? La cosmologie est la branche de l'astrophysique qui envisage l'origine, l'évolution et le destin de

l'Univers dans son ensemble. Dans le cadre de la théorie de la relativité générale, les fameux modèles de Big Bang prédisent soit, dans un futur infiniment lointain, une mort lente, froide et sombre ; soit, dans un futur plus proche (100 milliards d'années), une mort violente, chaude et éblouissante, en une conflagration finale symétrique du Big Bang. En d'autres termes, soit l'expansion actuelle de l'espace se poursuit à jamais, diluant et refroidissant sans cesse l'Univers – cette possibilité se subdivisant elle-même en deux, selon que l'expansion ralentit sans jamais s'arrêter, ou au contraire s'accélère ; soit au contraire l'expansion se ralentit fortement, dilate l'espace jusqu'à un volume maximal, puis laisse place à un mouvement inverse de contraction et de réchauffement s'achevant en un ultime embrasement de l'Univers, le Big Crunch (du mot anglais qui signifie « écrasement »).

Dans le premier scénario, l'Univers est ouvert, c'est-à-dire qu'il se dilatera indéfiniment, s'engourdissant progressivement vers le zéro absolu. Toutes les étoiles s'éteindront d'abord, dans 1 000 milliards d'années, et l'alchimie créatrice d'éléments s'arrêtera. L'Univers deviendra un immense désert jonché des débris épars de galaxies, d'étoiles éteintes et de planètes froides, encore parcouru par de faibles rayonnements infrarouges. Dans les éons qui suivront, l'Univers passera successivement par l'âge du fer – tout corps céleste transformé en sphère de fer –, et par l'âge des trous noirs, au bout d'un nombre tel d'années que tous les livres du monde écrits depuis l'aube de l'humanité ne contiendraient pas un tel chiffre. Les trous noirs eux-mêmes s'évaporeront, et tout finira en lumière froide.

Dans le second scénario, l'Univers est « fermé », c'est-à-dire qu'il cessera de se dilater dans 60 milliards d'années environ et il se contractera. Il passera alors par les mêmes stades que lors de sa phase expansive, mais selon un processus inverse et avec une grosse différence : les étoiles mortes ne se rallumeront pas. Au bout de 110 milliards d'années, l'Univers aura retrouvé sa température et ses dimensions actuelles, mais le système solaire sera détruit depuis longtemps. Puis les galaxies, constituées d'étoiles mortes et de trous noirs géants, fusionneront en un amas unique, l'Univers deviendra dense et opaque, sa température atteindra plusieurs milliers de degrés, les planètes seront vaporisées, les trous noirs géants engloutiront les résidus stellaires. Dans les derniers instants, la température grimpera encore, les atomes se briseront en particules élémentaires, les interactions fondamentales se combineront entre elles, l'espace-temps se désagrègera en une mousse quantique. La physique actuelle est incapable de prédire au-delà : nul ne sait si l'Univers disparaîtra en un point singulier, ou s'il rebondira pour donner naissance à un nouveau cycle cosmique, tel le phénix de la légende.

La réalisation effective de tel ou tel scénario dépend de la valeur de certains « paramètres cosmologiques », comme la courbure de l'espace, la densité et la nature de l'énergie cosmique. Jusqu'en 1996, la plupart des déterminations de la densité de l'Univers convergeaient vers une valeur privilégiant un univers en expansion perpétuelle ralentie ([courbes 2 ou 3 de la figure](#)). La situation a brusquement changé avec la mise en œuvre de nouvelles méthodes d'observation. Des équipes ont observé des supernovæ dans les galaxies lointaines, d'autres ont analysé les détails fins du rayonnement fossile – vestige refroidi du Big Bang nous parvenant sous forme d'un rayonnement micro-ondes. Dans les deux cas, les données favorisent un univers en expansion perpétuelle accélérée, l'accélération signifiant que les deux tiers de l'énergie cosmique se trouveraient essentiellement sous une forme étrange, peut-être due au vide quantique, qui agirait comme une véritable « dynamite » de l'espace, ayant tendance à le faire exploser en chaque point.



Les modèles de Big Bang, décrits pour la première fois par Friedmann et Lemaître dans les années 1920, se distinguent par leur courbure et par leur dynamique. Leur caractéristique essentielle est de proposer des solutions cosmologiques où l'espace varie au cours du temps. On représente (en ordonnées) un facteur d'échelle spatiale, c'est-à-dire une distance entre deux points quelconques suffisamment éloignés, dont on mesure la séparation au cours du temps (en abscisse).

Les modèles de Big Bang viables sont les modèles de Friedmann-Lemaître fermé (1) et ouvert (2), le modèle d'Einstein-de Sitter (3) – cas particulier à courbure strictement nulle, et le modèle de Lemaître à expansion accélérée (4). Le petit cercle représente l'époque présente (expansion observée). Pour déterminer sur quelle branche on se trouve réellement, donc pour extrapoler le destin ultime de l'Univers et son passé lointain, il faut déterminer la densité et la nature de l'énergie cosmique. Les mesures actuelles tendent à favoriser le modèle à expansion accélérée (4).

Le destin final de l'Univers dépend donc de cette énergie répulsive de nature inconnue, appelée *énergie sombre*. S'agit-il d'une constante ? Augmente-t-elle ou décroît-elle ? Si l'énergie noire décroît dans le futur, elle redeviendra inférieure à la force de gravitation (comme elle l'avait déjà été pendant les six premiers milliards d'années de l'histoire cosmique), et l'Univers finira en *Big Crunch*. Si elle est supérieure à la matière ou constante, elle gagnera la bataille contre la gravitation. L'expansion se poursuivra à jamais. Peu à peu, les astres éteints se convertiront en trous noirs, qui s'évaporeront. L'Univers ne sera qu'un bain de photons de plus en plus froids.

Si, en revanche, la proportion d'énergie noire augmente, le taux d'expansion deviendra si impérieux que l'Univers explosera à toutes les échelles : toute la matière de l'Univers, même les atomes, sera déchirée par la dilatation de l'espace. C'est ce que l'on appelle le *Big Rip*, le « grand déchirement », la fin définitive de la matière, qui laissera un univers vide, sans structure. Certains modèles prévoient qu'une telle fin de l'Univers pourrait se produire dans 22 milliards d'années. En l'état actuel des connaissances, nous ne savons rien encore sur le destin final de l'espace-temps lui-même.

Bien des méditations philosophiques peuvent naître de ces divers scénarios d'apocalypse, mais la parole finale revient au poète Gérard de Nerval (extrait de son recueil *Chimères*, 1854) :

« Immobile destin, muette sentinelle,
Froide nécessité ! Hasard qui, t'avançant
Parmi les mondes morts sous la neige éternelle,
Refroidis, par degrés, l'univers pâissant,

Sais-tu ce que tu fais, puissance originelle,
De tes soleils éteints, l'un l'autre se froissant...
Es-tu sûr de transmettre une haleine immortelle,
Entre un monde qui meurt et l'autre renaissant ? »

1- Article paru en 2003 dans *L'Esprit du temps*, « Études sur la mort », n° 124, Presses universitaires de France.

La géométrie du cosmos

« C'est dans les mathématiques que réside le principe vraiment créateur. En un certain sens, donc, je tiens pour vrai que la pensée pure est compétente pour comprendre le réel, ainsi que les Anciens l'avaient rêvé. »

Albert EINSTEIN,
Conférence à Oxford (1932).

Les mathématiques cosmiques¹

Lorsque, en 1927, Albert Einstein prit connaissance du modèle d'univers en expansion que le jeune Georges Lemaître venait de publier, il déclara : « Vos mathématiques sont superbes, mais votre physique abominable. » Outre la répugnance d'Einstein à envisager une cosmologie non statique – d'où son injuste appréciation de la physique de Lemaître –, cette réaction traduit le fait que le père de la relativité générale, l'un des plus grands physiciens de tous les temps, n'était pas un mathématicien de premier ordre : il se laissait plus impressionner par le savoir-faire mathématique de ses collègues que par leurs raisonnements physiques !

En 1912, son camarade d'études Marcel Grossmann, devenu professeur de mathématiques à Zurich, lui avait expliqué que, s'il voulait incorporer la gravitation dans la théorie de la relativité restreinte, il devait introduire un nouveau cadre mathématique, en l'occurrence la géométrie différentielle en espace courbe. Les outils permettant de traiter les espaces courbes étaient encore d'invention récente. Construits par Bernhard Riemann, ils avaient été développés par Elwin Christoffel, Gregorio Ricci, Tullio Levi-Civita et quelques autres sous le nom de « calcul tensoriel ». Einstein n'ayant aucune expérience dans ce domaine, c'est Grossmann qui rédigea la partie mathématique de la relativité générale.

La théorie vit le jour en 1915. Pendant de nombreuses années, elle fut cependant ignorée – voire repoussée avec horreur – par beaucoup de physiciens en raison de ses mathématiques rebutantes. La cosmologie, domaine d'application particulier de la relativité générale, autorise néanmoins une simplification considérable des équations d'Einstein et, par là même, du formalisme mathématique sous-jacent. Examinons ici la nature, ou plutôt l'esprit, des « mathématiques cosmiques ».

Le propos – et la folle ambition – de la cosmologie relativiste est de faire tenir la structure et le destin de l'Univers dans une poignée d'équations. En relativité générale, les effets de la gravitation ne s'interprètent pas comme une force engendrée par les corps massifs, mais se résorbent dans la structure géométrique même de l'Univers.

Cette identification entre gravitation et géométrie impose un cadre mathématique nouveau : celui d'un espace-temps à quatre dimensions, pourvu d'une métrique non euclidienne.

La métrique est une façon de mesurer la distance infinitésimale entre deux points voisins. De proche en proche, elle permet d'évaluer l'intervalle entre deux points quelconques de l'espace-temps, c'est-à-dire entre deux « événements », repérés chacun par trois coordonnées de position (x, y, z) et une coordonnée d'instant t . En cosmologie, des événements typiques sont l'émission d'une particule de lumière par une galaxie et sa réception sur Terre.

La métrique généralise le théorème de Pythagore qui, dans la géométrie euclidienne plane, spécifie que le carré de la distance entre deux points voisins est égal à la somme des carrés des distances projetées sur des axes de coordonnées orthogonaux : $dl^2 = dx^2 + dy^2$. Dans un espace-temps non euclidien, l'expression pythagoricienne se transforme en une somme plus compliquée mettant en jeu tous les produits deux à deux des coordonnées, c'est-à-dire des termes en $x^2, y^2, z^2, t^2, xy, xz, xt, yz, yt, zt$, chacun de ces dix produits étant affecté d'un coefficient qui dépend lui-même de la position et de l'instant. Ces coefficients $g_{xx}, g_{yy}, g_{xy}, g_{yz}$, etc., appelés *potentiels de métrique*, deviennent les variables essentielles de la nouvelle théorie de la gravitation, car ils définissent entièrement les propriétés de courbure de l'espace-temps. On vérifie aisément qu'ils sont au nombre de dix.

Les équations d'Einstein explicitent le couplage entre la géométrie de l'espace-temps et son contenu matériel. Elles généralisent l'équation de Poisson qui, dans la théorie newtonienne classique, relie le potentiel gravitationnel (donné par une seule quantité, dite scalaire) à la densité de matière (également scalaire). En relativité générale, la gravitation est décrite non plus par un seul potentiel mais par les dix potentiels de métrique.

De façon très schématique, les équations d'Einstein se réduisent à l'égalité

$$G = T,$$

c'est-à-dire :

géométrie = matière.

Les symboles ***G*** et ***T*** sont écrits en caractères gras pour signifier qu'il ne s'agit pas de simples nombres, mais d'objets mathématiques appelés « tenseurs », sortes de tableaux à seize composantes (matrices de quatre lignes et quatre colonnes semblables aux cases d'un petit damier) contenant toute l'information sur la géométrie et sur la distribution de matière.

Le membre de gauche, ***G***, se construit à partir d'un autre tenseur ***R*** dit « de Ricci », qui contient toutes les informations sur la courbure ;

son expression a été trouvée par Einstein et Grossmann, après de nombreux essais infructueux, grâce à un raisonnement physique. Dans la première version des équations du champ gravitationnel, donnée par Einstein en 1915, on avait :

$$G = R - 1/2gR$$

où g est le tenseur de métrique rassemblant en tableau les potentiels de métrique, et R est la courbure scalaire de l'espace-temps.

Dans la deuxième version donnée en 1917, Einstein introduisit la constante cosmologique λ , de sorte que :

$$G = R - 1/2gR + \lambda g$$

Le membre de droite, représenté par le tenseur T dit d'« énergie-impulsion », contient toute l'information sur la distribution et le mouvement des différentes formes d'énergie dans l'Univers, matière et rayonnements. Une excellente approximation de l'état actuel de l'Univers est un gaz de pression nulle dont les molécules, sans interaction mutuelle, sont les galaxies. Pour décrire simplement l'univers primordial chaud, on peut aussi ajouter une densité d'énergie et une pression, sous forme de rayonnement. Dans les deux cas, l'état de la matière est celui d'un « fluide parfait » décrit par deux nombres qui dépendent en principe du temps, la densité $\rho(t)$ et la pression $p(t)$. Notons que le terme « supplémentaire » λg peut tout autant être considéré comme faisant partie du membre de gauche G – auquel cas il s'interprète comme une composante de la géométrie – que comme faisant partie du membre de droite T – auquel cas il s'interprète comme une contribution à l'énergie.

Les équations d'Einstein sont impossibles à résoudre dans toute leur généralité. Pour en trouver des solutions exactes, il faut simplifier le membre de gauche, en supposant des symétries d'espace-temps particulières, et simplifier le membre de droite, en réduisant le contenu matériel de l'Univers à sa plus simple expression : selon la région de l'Univers que l'on veut décrire, on peut supposer le vide, une masse isolée, un fluide de galaxies, etc.

Avec ce souci de symétrie et de simplicité, on voit resurgir une idée platonicienne, mais ici pour de moins nobles raisons, puisqu'il s'agit simplement de parvenir à résoudre une équation ! C'est exactement ce que l'on fait pour construire un modèle cosmologique qui soit une solution de la relativité générale. Il est heureux que, dans le cas de la cosmologie, les simplifications se justifient en grande partie. En effet, qu'observe-t-on sur la répartition réelle de matière dans l'Univers à grande échelle ? Tout d'abord une remarquable symétrie autour de nous, qu'on appelle isotropie, les propriétés physiques de l'Univers ne dépendant pas de la direction dans laquelle on observe. Une seconde symétrie fondamentale est postulée plutôt qu'observée : il s'agit de l'homogénéité spatiale, selon laquelle les

propriétés physiques sont les mêmes quel que soit le point de l'espace considéré à un moment donné. Ces deux postulats réunis, homogénéité et isotropie, forment le principe cosmologique, qui parachève l'idée de Copernic tendant à en finir avec l'anthropocentrisme.

Mathématiquement, le principe cosmologique se traduit par le fait que l'espace est à courbure constante dans l'espace. La métrique prend alors une forme simple, mettant en exergue un facteur d'échelle universel $a(t)$ qui, à chaque instant, a la même valeur dans l'espace, et tel que la distance entre deux points quelconques varie au cours du temps proportionnellement à a . Ce facteur d'échelle est parfois appelé « rayon d'univers », mais le terme est abusif, car il ne prend ce sens que dans le cas des espaces de taille finie.

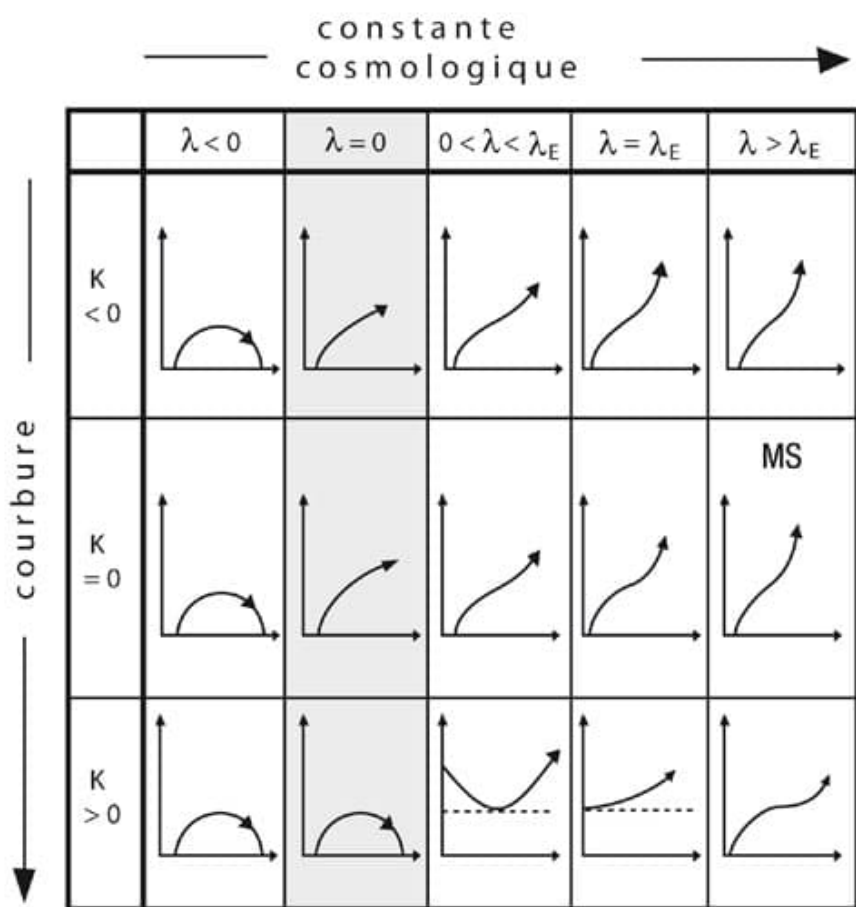
Puisque la courbure est constante dans l'espace, seuls trois cas sont à considérer, selon le signe qu'elle peut prendre. Ainsi, la courbure est donnée par l'expression $k/a^2(t)$, k pouvant prendre les valeurs $+1$, 0 et -1 : si la courbure est positive ($k = +1$), l'espace est sphérique et nécessairement fini (comme l'hypersphère) ; si elle est nulle ($k = 0$), l'espace est euclidien ; si elle est négative ($k = -1$), l'espace est hyperbolique. Les espaces euclidiens et hyperboliques peuvent être de volume fini ou infini ; la question relève de la topologie, non pas des équations relativistes.

La résolution des équations d'Einstein tenant compte des simplifications précédentes et de la constante cosmologique fournit tout un ensemble de modèles cosmologiques dits de Friedmann-Lemaître. Un modèle de Friedmann-Lemaître est caractérisé par sa courbure, par sa dynamique temporelle et par sa topologie. Seules les deux premières sont calculables par les équations de la relativité. La dynamique est donnée par la façon dont le facteur d'échelle $a(t)$ et la densité $\rho(t)$ varient au cours du temps. Quand a augmente, l'Univers est en expansion et les distances entre galaxies lointaines augmentent au cours du temps. Dans le cas contraire, les distances diminuent au sein d'un Univers en contraction. Certains modèles peuvent parfaitement présenter successivement des phases d'expansion et de contraction au cours de leur évolution. La plupart des solutions de Friedmann-Lemaître ont un début singulier, c'est-à-dire un temps t du passé où le facteur d'échelle $a(t)$ s'annule : ce sont les fameux « modèles de Big Bang ». Le facteur d'échelle peut aussi s'annuler dans le futur, auquel cas l'Univers finit dans un « Big Crunch ».

La figure récapitule sous forme graphique toutes les évolutions temporelles possibles du facteur d'échelle $a(t)$, en fonction des deux paramètres cosmologiques fondamentaux qui sont le signe de la courbure et la valeur de la constante cosmologique. Au cours des quatre-vingts ans d'histoire de la cosmologie relativiste, la faveur des

chercheurs s'est portée tour à tour sur l'une ou l'autre case de ce tableau. Les prétendues remises en cause du Big Bang qu'on lit régulièrement dans la presse de vulgarisation ne font que rapporter les glissements de consensus qui ont cours chez les professionnels autour des valeurs admises des paramètres cosmologiques ; elles ne sortent que rarement du cadre général des solutions homogènes de Friedmann-Lemaître, et ce pour une raison simple : si l'on s'en écarte, il est pratiquement impossible de trouver des solutions exactes des équations d'Einstein !

Les dernières données expérimentales (observations du rayonnement fossile par le satellite WMAP en 2003) favorisent un modèle à courbure spatiale positive mais faible, et une dynamique dominée par l'énergie du vide, interprétation moderne de la constante cosmologique. Il en résulte une expansion perpétuelle accélérée ([case MS dans la figure page suivante](#)).



Représentation graphique des univers de Friedmann-Lemaître

La dynamique des modèles cosmologiques de Friedmann-Lemaître, c'est-à-dire la variation du

facteur d'échelle spatiale en fonction du temps cosmique, est déterminée par le signe (k) de la courbure des sections spatiales et par la valeur de la constante cosmologique λ . Deux valeurs particulières de cette dernière sont $\lambda = 0$ et $\lambda = \lambda_E$, où λ_E est la valeur proposée en 1917 par Einstein afin d'assurer le caractère statique de son univers hypersphérique. Puisqu'une constante cosmologique positive équivaut à une action répulsive à grande distance, tous les modèles à grande constante cosmologique ($\lambda > \lambda_E$) sont « ouverts » dans le temps, c'est-à-dire en expansion perpétuelle, quelle que soit leur courbure. À l'inverse, une constante négative $\lambda < 0$ (peu vraisemblable sur le plan physique) contribuerait à augmenter la gravité effective, de sorte que les modèles d'univers correspondants finiraient tous par s'effondrer sur eux-mêmes.

Dans certains cas ($k > 0$ et $0 < \lambda \leq \lambda_E$), la singularité initiale peut même disparaître ; toutes les solutions de Friedmann-Lemaître ne sont donc pas des modèles à Big Bang.

La nouvelle cosmologie¹

De l'écume de l'espace-temps à l'univers chiffonné

La cosmologie est l'étude de l'Univers dans son ensemble, à toutes les échelles de temps, d'espace et de matière. Cette discipline, vieille de vingt-cinq siècles, a toujours eu un impact philosophique considérable car l'espace est notre demeure, le temps est notre fleuve, la matière est notre substrat.

Dès l'Antiquité grecque, trois grandes questions cosmologiques se sont posées : le temps a-t-il une origine ? L'espace est-il fini ou infini ? Quelle est la composition ultime de la matière ? Ce n'est qu'au XX^e siècle que les acquis théoriques et observationnels ont permis d'aborder en profondeur ces questions. La cosmologie contemporaine est en effet fondée sur les théories de la relativité générale et de la physique quantique, sur les observations accomplies par les grands télescopes au sol et dans l'espace dans les divers domaines de longueurs d'onde, et sur certaines expériences en physique des hautes énergies.

Du modèle classique au modèle standard

Selon la relativité générale, l'Univers est décrit par une structure géométrique spatio-temporelle et un contenu énergétique (matière, rayonnements et champs de diverses natures), dont le couplage et la dynamique sont régis par les équations d'Einstein :

$$\text{GÉOMÉTRIE} = \text{ÉNERGIE (1)}$$

Ce cadre formel permet de concevoir une grande variété de modèles d'univers, dont les prédictions caractéristiques doivent être confrontées aux observations. Les astrophysiciens retiennent les solutions qui décrivent un univers homogène et isotrope, c'est-à-dire contenant de la matière uniformément répartie dans l'espace, indépendamment de la direction. Cette hypothèse, en grande partie justifiée par les observations à très grande échelle, implique que la

courbure de l'espace est la même en chaque point. Soit cette courbure constante est négative, auquel cas l'espace est de géométrie hyperbolique, soit elle est positive, auquel cas l'espace est de géométrie elliptique, soit elle est nulle, et l'espace est de géométrie euclidienne. Lorsque la distribution de matière est décrite par un fluide parfait de galaxies avec ou sans rayonnement, les solutions exactes des équations d'Einstein sont appelées modèles classiques de Friedmann-Lemaître, du nom de leurs découvreurs. Le terme « classique » signifie que certains aspects fondamentaux ne sont pas pris en compte, comme les propriétés quantiques de la matière ou les variantes topologiques de l'espace-temps.

Malgré leur grande simplicité, les modèles de Friedmann-Lemaître permettent de dresser de l'Univers une impressionnante fresque, longue d'environ 15 milliards d'années, qui conduit à envisager la naissance de l'espace-temps dans un événement singulier – le Big Bang –, dont toutes les structures matérielles existantes constitueraient une sorte d'écume. L'évolution cosmique qui s'est déroulée au cours de l'expansion plus ou moins rapide du tissu spatial rend compte de la formation progressive des structures à différentes échelles de taille et de complexité, comme les noyaux atomiques, le rayonnement de fond cosmologique, les nuages d'hydrogène moléculaire, les galaxies, amas et superamas de galaxies, les étoiles et les planètes. Les observations de nature cosmologique comme le noir du ciel, le décalage spectral vers le rouge des galaxies, la proportion des éléments chimiques légers et l'existence d'un rayonnement diffus de corps noir à la température de 2,728 K uniformément réparti sur le fond de ciel sont parfaitement expliqués par les modèles relativistes classiques. En revanche, la structure détaillée des petites irrégularités observées dans le rayonnement de fond, ainsi que diverses questions de physique fondamentale comme l'existence d'une constante cosmologique, le nombre d'espèces différentes de neutrinos, l'asymétrie matière/antimatière, etc., nécessitent un élargissement de la théorie classique.

Ce qu'il est convenu d'appeler la *nouvelle cosmologie* repose sur l'importation de concepts issus de la physique quantique au sein des modèles de Big Bang classiques : unification des interactions, brisures spontanées de symétrie, défauts topologiques, fluctuations du vide, etc. Le caractère spéculatif de ces apports confère au débat cosmologique actuel une vivacité qu'il n'avait plus connue depuis l'époque où les thèses novatrices de Lemaître changèrent de façon irréversible le cours de la discipline. Nombre de physiciens souffrant d'amnésie (parfois volontaire), il est bon de rappeler point par point les thèses cosmologiques que Lemaître a proposées entre 1927 et 1933 :

— interprétation des observations du décalage vers le rouge des galaxies par une expansion générale de l'espace, prévue par la théorie de la relativité ;

— résolution des équations du champ d'Einstein pour les univers à courbure spatiale constante, constante cosmologique et fluide parfait avec pression, donnant tous les cas de figure possibles pour l'évolution passée et future de l'Univers ;

— hypothèse de l'atome primitif, c'est-à-dire d'un état initial de l'Univers ultradense et ultrachaud ;

— idée que des fossiles de cette époque primitive doivent subsister aujourd'hui sous forme de rayonnements de diverses natures ;

— vues originales sur la constante cosmologique, permettant de réconcilier l'âge théorique de l'Univers avec l'âge observé des plus vieilles étoiles, permettant également de laisser le temps aux galaxies de se former sur des échelles de temps adéquates, et tentative d'interprétation théorique de cette constante par une redéfinition du niveau zéro de l'énergie gravitationnelle ;

— affirmation que la structure locale de l'espace, qu'il soit elliptique, euclidien ou hyperbolique, ne préjuge en rien de sa structure globale, c'est-à-dire de sa topologie ;

— idée enfin que l'origine ultime de l'espace-temps ne pourra éventuellement s'expliquer que si l'on dispose d'une théorie unifiée de la relativité et de la physique quantique.

Si certains de ces points ont rapidement été adoptés par la communauté astronomique, d'autres ont traversé un véritable purgatoire avant de resurgir aujourd'hui, tels des phénix, à la lueur de la « nouvelle » cosmologie. Cette dernière propose un modèle dit *standard*, toujours bâti sur l'équivalence entre géométrie de l'espace-temps et distribution de matière-énergie stipulée par l'équation relativiste (1), à la différence près que le membre de droite de l'équation est dorénavant traité dans le cadre de la théorie quantique des champs et des modèles de grande unification (GUT).

Il est à noter qu'à ce stade, l'unification qualifiée de « grande » par les physiciens des particules ne porte que sur trois des quatre interactions fondamentales, c'est-à-dire les interactions électromagnétique, faible et forte, ce qui laisse de côté l'interaction gravitationnelle. Malgré tout, certains faits qui restaient inexpliqués par les modèles classiques de Big Bang, comme l'abondance et la nature de la matière sombre, l'absence d'antimatière, le spectre des fluctuations du fond diffus cosmologique ou l'uniformité de la répartition de la matière à grande échelle, semblent trouver une explication naturelle grâce à cette physique des hautes énergies appliquée à l'univers primitif. Les brisures spontanées de symétrie

associées aux découplages des interactions au cours du refroidissement cosmique, l'apparition de défauts topologiques tels que cordes, murs ou textures cosmiques, ou l'avènement de la fameuse inflation – brève période pendant laquelle les dimensions de l'univers primitif auraient augmenté dans des proportions gigantesques – sont des conséquences (bienvenues ou non) de cette approche, qui soulèvent des problèmes cosmologiques nouveaux, non prévus par les modèles classiques.

Quelques opinions orthodoxes en cosmologie

Comme en tout autre domaine de la pensée, ce bouillonnement d'idées neuves n'est pas exempt d'une certaine pensée orthodoxe, qui restreint le débat en l'orientant selon certains partis pris arbitraires. L'opinion orthodoxe en sciences a souvent tendance à devenir conventionnelle. Dirigée dans le double but d'éviter les complications et de publier vite, elle devient hâtive, superficielle et oublieuse de ses sources historiques. D'autre part, en devenant hégémonique, elle tend à freiner le développement d'autres approches qui sont à contre-courant des modes et des effets d'annonce, ou bien exigent une maturation lente. Lemaître a été l'exemple parfait d'un chercheur à la pensée non conventionnelle, et c'est l'une des raisons pour lesquelles certaines de ses idées ont subi d'aussi longs purgatoires.

L'orthodoxie cosmologique a notamment cherché à imposer les trois vues réductrices suivantes :

- la constante cosmologique serait nulle ;
- l'espace serait euclidien (ou, ce qui revient au même, la densité totale de matière-énergie serait exactement égale à la densité critique) ;
- la topologie de l'espace serait simplement connexe.

Ces hypothèses restrictives sont en réalité fondées sur des applications douteuses du « principe de simplicité ». Or les arguments de simplicité sont parfaitement subjectifs. Ils varient au cours du temps, dépendant notamment du cadre théorique consensuel et de l'état d'avancement des vérifications expérimentales. Analysons les deux premiers points, ayant trait à l'existence d'une constante cosmologique et au caractère euclidien de l'espace. Le dernier point sera développé en fin d'article.

La constante cosmologique

Les équations du champ relativiste (1) s'écrivent sous la forme générale :

$$S = T \quad (2)$$

où S est le tenseur géométrique décrivant les propriétés de

courbure de l'espace-temps et T est le tenseur matériel (dit aussi d'impulsion-énergie) décrivant la distribution de matière-énergie. Pour des raisons de cohérence physico-mathématique, S et T doivent être des tenseurs symétriques du second ordre, à divergence nulle, ne dépendant que des potentiels de métrique g et de leurs dérivées premières et secondes, ces dernières y figurant de façon linéaire.

Dans la première version des équations du champ proposée par Einstein (1915), le tenseur géométrique était donné par :

$$S = R - 1/2 g R \quad (3)$$

où R est le tenseur de courbure de Ricci et R sa valeur scalaire contractée. Lorsque Einstein (1917) calcula pour la première fois une solution cosmologique sphérique des équations (2), il s'aperçut que sa théorie prédisait un modèle d'univers non statique, c'est-à-dire variable au cours du temps. Persuadé que le rayon de l'univers devait au contraire rester constant, Einstein modifia le tenseur géométrique S de façon à forcer sa solution à rester statique. Le prix à payer fut l'introduction d'un terme supplémentaire dans (3) :

$$S = R - 1/2 g R + \Lambda g \quad (4)$$

Le paramètre Λ (lire Lambda), destiné à « sauver les apparences », avait pour effet d'engendrer une force de répulsion cosmique à grande échelle, contrebalançant la tendance naturelle à la contraction. Il fut baptisé « constante cosmologique ». Une décennie plus tard, les apparences changèrent du tout au tout avec la découverte expérimentale de l'expansion cosmique, par Slipher et Hubble, et la constante cosmologique devint apparemment inutile.

La situation n'était pas aussi simple. Dès 1922, Elie Cartan avait démontré que l'expression (4) du tenseur géométrique était la forme la plus générale permettant d'assurer à une théorie relativiste de la gravitation sa cohérence mathématique. On mesure ainsi le côté arbitraire du principe de simplicité ; ici, la propriété de généralité mathématique pouvait parfaitement être invoquée pour définir un nouveau critère de simplicité maximale, dans lequel la constante cosmologique perdait non seulement son caractère superflu, mais acquérait au contraire un statut d'existence impérative. Malgré tout, Lemaître est resté le seul avocat de la constante cosmologique. Ses échanges verbaux ou épistolaires avec Einstein à ce sujet sont éclairants². Après des années de réticence à l'égard des solutions dynamiques, Einstein avait fini par céder aux arguments observationnels et par renier la constante cosmologique, ne cessant d'en regretter le caractère « superflu et abominable ». Lemaître a soutenu qu'au contraire, il fallait impérativement conserver cette constante, répétant sans relâche à Einstein qu'il avait eu « sans le savoir » une idée de génie ! Si Lemaître tenait tant à ce facteur, c'est notamment parce que les modèles dynamiques à constante

cosmologique nulle entraient en conflit avec les observations, en produisant un univers trop jeune. En outre, une constante cosmologique à la valeur bien ajustée permettait d'allonger la phase de formation des galaxies, processus qui posait déjà à l'époque un problème d'échelle de temps. Lemaître soupçonnait enfin, de façon tout à fait prémonitoire, qu'une justification physique de la constante cosmologique devait résider dans la mécanique quantique, laquelle devrait un jour permettre de fixer le niveau minimum de l'énergie gravitationnelle, qui en relativité n'est définie qu'à une constante additive près.

Lemaître n'est jamais parvenu à convaincre ni Einstein, ni l'essentiel de la communauté scientifique. La constante cosmologique est passée par un long purgatoire. En 1964, le physicien russe Zeldovich a concrétisé l'idée de Lemaître en suggérant que le vide quantique possédait une énergie non nulle se manifestant à l'échelle cosmique par une constante cosmologique. Les théoriciens de la grande unification se sont de nouveau intéressés à ce facteur, mais leurs modèles prédisaient une valeur incommensurablement trop grande de la constante, de sorte que les cosmologistes continuèrent à considérer cette constante comme superflue. Aussi, la plupart d'entre eux ont-ils été surpris lorsqu'en 1998, deux équipes différentes d'observateurs, étudiant la luminosité de certaines supernovæ, ont annoncé que l'expansion cosmique s'accélérait au lieu de se ralentir, l'interprétation la plus simple étant une constante cosmologique non nulle, équivalente à une densité d'énergie du vide constante au cours de l'expansion. Quelle valeur numérique adopter ? L'échantillon de supernovæ étudié étant peu profond et les supernovæ elles-mêmes étant soumises à des effets d'évolution, la marge d'erreur expérimentale était grande, de sorte qu'il était difficile d'attribuer une valeur numérique précise à la constante cosmologique ainsi « redécouverte ».

Nous allons voir comment la seconde opinion orthodoxe, relative cette fois au caractère euclidien de l'espace, est alors venue à la rescousse pour conférer à la constante cosmologique une valeur parfaitement ajustée.

La courbure de l'espace

En cosmologie relativiste, la courbure de l'espace (la même en chaque point) est liée à la densité totale de matière-énergie contenue dans l'Univers. Si celle-ci est inférieure à une certaine valeur critique calculée par la théorie, l'espace est hyperbolique ; si celle-ci est supérieure à la valeur critique, l'espace est elliptique. À la frontière exacte, l'espace est euclidien. On définit donc un paramètre

observable Ω , rapport de la densité réelle à la densité critique. Le cas euclidien correspond à $\Omega = 1$.

Il va de soi que, pendant des décennies, la précision des données sur la densité réelle de l'Univers était trop médiocre pour fournir d'autre contrainte que l'intervalle $0.01 < \Omega < 2$. Les premiers modèles relativistes d'Einstein (1917) et de Sitter (1917) supposèrent une courbure positive. Les solutions dynamiques découvertes par Friedmann (1922) étaient également à géométrie elliptique, tandis que les solutions hyperboliques ont été étudiées dans son second article (1924). Lemaître (1927) a examiné tous les cas de courbure possibles, tout en privilégiant l'hypothèse elliptique. Robertson (1929) fournit la métrique très générale des univers spatialement homogènes et isotropes, contenant l'espace euclidien comme cas très particulier.

C'est alors que s'est produit un coup de théâtre épistémologique : en 1932, Einstein et de Sitter, les deux promoteurs de l'univers statique, ont uni leurs efforts pour « rattraper leur bourde » et reconnaître enfin la réalité de l'expansion cosmique. Ils ont publié un article d'une page où ils firent valoir qu'un univers en expansion était possible sans introduire ni courbure spatiale, ni pression de matière, ni constante cosmologique. Il suffisait pour cela que la densité de matière fût exactement égale à la valeur critique séparant les cas elliptique (courbure positive) et hyperbolique (courbure négative). Leur solution avait le mérite d'être parée de toutes les vertus liées au « principe de simplicité » : faisant intervenir le nombre minimum de paramètres, elle était plus facilement compréhensible et calculable ! En l'absence de toute observation contradictoire, et grâce à ses deux prestigieux signataires, le modèle euclidien d'Einstein-de Sitter est devenu l'opinion orthodoxe et s'est imposé pendant soixante ans, occultant toute la richesse potentielle des solutions de Friedmann-Lemaître.

Dans la mesure où la théorie relativiste de la gravitation fait intervenir des espaces riemanniens naturellement courbes, il peut paraître étrange de supposer que l'espace cosmique ait une courbure globale strictement nulle. Malgré tout, l'orthodoxie euclidienne s'est vue considérablement renforcée avec les modèles d'inflation développés à partir des années 1980. En effet, les GUT prédisent que les fluctuations du champ scalaire associé au vide quantique créent des bulles de « faux vide », c'est-à-dire des régions à pression fortement négative, dont l'effet sur le tissu spatial est d'engendrer une dilatation exponentiellement rapide, le conduisant à acquérir rapidement une géométrie euclidienne. Ce processus singulièrement « lisseur » se serait déroulé vers 10^{-35} seconde après le Big Bang.

Ce concept de base, reposant sur une physique encore bien incertaine et sur un champ scalaire inconnu, a engendré de nombreux modèles tentant chacun à leur tour, en vain, d'accorder leurs

prédictions théoriques aux données expérimentales (fluctuations de densité dans le rayonnement de fond cosmologique, distribution à grande échelle des amas de galaxies, etc.). C'est ainsi que l'on a vu successivement fleurir – ou sévir, selon le point de vue – l'inflation ordinaire, l'inflation hybride, la double inflation, l'inflation chaotique, l'inflation hyperbolique, l'inflation éternelle, etc. Sur le plan épistémologique, on ne peut s'empêcher de comparer ces scénarios inflatoires aux épicycles de la théorie planétaire de Ptolémée.

Toutefois, les observations astronomiques suggéraient plutôt un univers de densité sous-critique ; les recensements de la matière visible et sombre conduisent en effet à $\Omega_m = 0,3$, impliquant un espace à géométrie hyperbolique, contraire à l'opinion orthodoxe. Une autre source de désaccord, généralement négligée par les astrophysiciens car de nature purement mathématique (tout comme l'argument de Cartan en faveur de la constante cosmologique), est que parmi toutes les géométries possibles pour les variétés riemanniennes tridimensionnelles à courbure constante, la géométrie hyperbolique est *générique*, tandis que la géométrie euclidienne n'est qu'un sous-ensemble de mesure nulle.

L'orthodoxie guette tout événement susceptible de la (ré)conforter. Un tel événement s'est produit en 1998 : la prétendue découverte expérimentale, fondée sur l'étude de supernovæ, de l'accélération de l'expansion cosmique. La nouvelle était providentielle. Il suffisait d'oublier les barres d'erreur et d'en extraire la valeur « probable » de la contribution de la constante cosmologique à la densité d'énergie totale : $\Omega_\Lambda = 0,7$, et le tour de passe-passe était joué, puisque $0,3 + 0,7 = 1$!

Bien des articles ont montré depuis les faiblesses des observations de supernovæ et la façon dont les nombreux biais observationnels pouvaient parfaitement expliquer les données sans constante cosmologique. Mais rien n'y fait. L'hypothèse orthodoxe $\Omega = 1$ ainsi revigorée ne peut être abandonnée aussitôt. Ajoutons à cela de très récentes observations utilisant les données du rayonnement de fond cosmologique (dépendantes d'hypothèses sur la statistique des fluctuations) ou bien les comptages de galaxies, suggérant elles aussi un Univers plat dominé par la constante cosmologique : le couple $(\Omega_m - \Omega_\Lambda) = (0,3 - 0,7)$ a toutes les chances de faire office de nouvelle opinion orthodoxe au cours des prochaines années.

L'écume de l'espace-temps

Le modèle standard de Big Bang pose des questions de fond, concernant la *singularité initiale* (en mathématiques, une singularité est un point où certaines quantités deviennent infinies ; ici la courbure, la

température, la densité d'énergie, etc.) et la *topologie* de l'espace-temps. Elles mettent en jeu la validité même de la relativité générale.

Il est courant de souligner que la théorie d'Einstein est incomplète à très petite échelle de distance (ou, ce qui revient au même, à très haute énergie), dans la mesure où elle n'incorpore pas les préceptes de la physique quantique qui décrit le monde microscopique. Il serait donc extrêmement téméraire d'extrapoler les résultats de la relativité générale jusqu'à des distances arbitrairement petites, en particulier celles correspondant à une singularité. On sait même que l'on ne peut pas le faire à des échelles spatiales inférieures à la longueur de Planck (10^{-33} centimètre). Cette échelle joue le rôle d'une sorte d'horizon microscopique. Sans savoir ce qui se passe exactement à ces dimensions, les physiciens estiment que la géométrie pourrait devenir elle-même sujette à des fluctuations quantiques, que la relativité classique ne permet pas de prendre en considération.

Or les modèles de Big Bang indiquent que le facteur d'échelle spatiale de l'Univers a dû atteindre une valeur comparable à 10^{-33} centimètre dans le passé. À cette « ère de Planck », température et densité étaient énormes, respectivement voisines de 10^{32} K et 10^{94} g/cm³. Dans ces conditions, la relativité générale ne peut être appliquée car les effets quantiques deviennent prépondérants : une théorie de la *gravitation quantique* devient impérative, ou du moins une théorie qui unifie les interactions physiques.

Cela interdit donc de remonter l'histoire passée de l'Univers jusqu'au temps zéro de la singularité. Les lois de la physique n'y sont plus valables, ni même les concepts les plus élémentaires d'espace et de temps. Lorsqu'on essaie d'imaginer les états antérieurs, on débouche sur un flou quantique. Ainsi, l'histoire de l'Univers ne peut être considérée qu'à partir de l'ère de Planck. Ce n'est pas le « vrai » début de l'Univers, mais c'est le début de la période pendant laquelle on peut le décrire, et dans une certaine mesure, le comprendre.

Dans le programme ambitieux de quantification du champ gravitationnel lui-même (mettant en jeu des théories de supergravité, supercordes ou membranes, dimensions supplémentaires de l'espace ou autres approches), le membre de gauche de l'équation (1) serait lui-même modifié, mais à ce jour aucun modèle de gravité quantique consistant et calculable n'est à portée de main, que ce soit au niveau théorique ou expérimental.

Peut-on en dire davantage sur cette ère de Planck qui marque la frontière de nos connaissances ? Le cadre habituel de la variété espace-temps, continue, à quatre dimensions, éclate complètement. Une approche possible consiste à considérer qu'au niveau microscopique, la géométrie de l'Univers pourrait être « floue », comparable à une sorte d'écume constamment agitée de petites

fluctuations : on pourrait la comparer à la surface d'un océan. Vu d'avion, l'océan paraît lisse. À plus basse altitude, sa surface reste continue mais on commence à percevoir quelques mouvements qui l'agitent. Examiné de très près, l'océan est tumultueux, discontinu même puisque des vagues se brisent, projetant des gouttes d'eau qui s'élèvent et retombent. De la même façon, si l'espace-temps paraît continu à l'échelle humaine et même à celle des noyaux atomiques, son « écume » deviendrait perceptible à l'échelle de Planck et produirait des gouttes se manifestant à nous sous forme de particules élémentaires.

Un tel schéma est invoqué dans certains scénarios de naissance spontanée de l'Univers par fluctuation spontanée du vide quantique – ce dernier jouant le rôle de l'océan d'énergie. Par exemple, avec l'« inflation chaotique », Andrei Linde présente une solution (qui n'est qu'approximative) sous forme d'un gigantesque univers éternel et autoreproducteur constitué d'une « mousse de mini-univers ». Chaque bulle de cette mousse aurait ses propres caractéristiques : constantes physiques, nombre de dimensions spatiales, dynamique. Tout notre univers observable ne serait qu'une infime partie de l'une de ces bulles, démesurément gonflée par une expansion ultra-efficace, l'inflation. Même si chaque bulle individuelle – en particulier celle qui constituerait « notre univers » – pouvait naître et mourir, l'Univers global ou « multivers » n'aurait ni commencement ni fin. Bien évidemment, ce ne sera sans doute jamais vérifiable ni observable. On est donc vraiment aux frontières de l'approche scientifique, et sans doute déjà de l'autre côté.

La topologie de l'Univers

Il est moins courant de remarquer que la relativité générale est aussi incomplète à grande échelle spatiale ; en tant que théorie métrique de la gravitation gouvernée par des équations aux dérivées partielles, elle ne permet de traiter que les propriétés géométriques locales de l'Univers, et non ses caractéristiques globales comme sa topologie. La relativité générale nous enseigne que l'espace peut avoir une courbure positive, négative ou nulle, mais elle ne nous dit pas quelle est la taille de l'espace, si son volume est fini ou infini, quelle est sa forme. Ce champ nouveau de recherches, appelé *topologie cosmique*, connaît un fort regain d'intérêt depuis un article de synthèse publié en 1995 par Marc Lachièze-Rey et moi-même³. On a vu dès lors une croissance exponentielle du nombre d'articles sur la topologie cosmique, provenant de divers groupes à travers le monde. Le point de départ est que les univers euclidiens ou hyperboliques, dits « ouverts » car en expansion perpétuelle, peuvent parfaitement être fermés dans

l'espace, c'est-à-dire de volume fini, et de taille plus petite que l'espace observé, si leur topologie n'est pas simplement connexe.

Mathématiquement, un espace est dit posséder une topologie simplement connexe si en chacun de ses points, toute courbe fermée peut être continûment contractée en un point ; c'est le cas, par exemple, du plan euclidien infini ou de la surface d'une sphère. Dans le cas contraire, la topologie est dite *multiplement connexe*. Toute surface qui possède par exemple un trou (comme un tore ou une sphère munie d'une poignée) est multiplement connexe. À trois dimensions, un modèle simple d'espace plat multiplement connexe est l'hypertore, qui peut se concevoir à partir d'un cube dont les faces opposées sont identifiées. C'est un espace euclidien sans bord ni frontière, mais de volume fini.

Pour une métrique donnée, la topologie la plus simple est celle de l'espace simplement connexe ayant localement cette métrique. Toutefois, la pertinence physique ne se mesure pas nécessairement à l'aune de la simplicité mathématique : les variétés riemanniennes utilisées en relativité générale sont moins « simples » que l'espace euclidien. Dès lors, qu'est-ce qui peut guider le choix du physicien en matière de topologie ?

Sur le plan théorique, de nouvelles approches de l'espace-temps, comme celle de la cosmologie quantique, suggèrent la nécessité d'un volume spatial fini pour bâtir des modèles d'univers consistants, et certains calculs de probabilité d'apparition d'univers favorisent les espaces hyperboliques de plus petit volume – ce qui peut fournir un nouveau paradigme de ce qu'on peut appeler l'espace « le plus simple ».

Sur le plan expérimental, comment les topologies théoriquement possibles peuvent-elles être confrontées aux observations ? Pour un ensemble de valeurs données des paramètres de courbure et de la constante de Hubble, la taille d'un univers hypertorique peut, par exemple, être aussi petite que 3 milliards d'années-lumière ou aussi grande que l'horizon (50 milliards d'années-lumière). L'évolution des fonctions de luminosité des galaxies et des quasars, le taux de formation d'étoiles au cours de l'histoire cosmique et autres quantités observationnelles de même nature ne permettraient pas de faire la distinction entre ces topologies admissibles. Ce type d'observations ne contraint pas la taille réelle de l'Univers. Bien que le rayon de courbure et la constante de Hubble aient des effets importants sur la taille de l'univers *observable*, c'est-à-dire sur le rayon de l'horizon, leur influence sur la taille de l'univers physique est faible. La seule signature topologique possible ne peut venir que des photons effectuant différents trajets dans l'espace multiplement connexe, de sorte que chaque source de radiation peut être vue sous des images

topologiques multiples. Si le volume de l'Univers est comparable ou plus petit que celui de l'univers observable (défini par le rayon de l'horizon), il doit exister des signatures de la topologie codées dans la distribution à grande échelle des objets cosmiques et dans le rayonnement de fond cosmologique.

Dans un univers « chiffonné », c'est-à-dire multiplement connexe sur une échelle plus petite que l'horizon, les sources cosmiques (ou les différentes régions du plasma émettrices du fond diffus cosmologique) peuvent être vues plusieurs fois dans des directions différentes et, en général, à des époques différentes, c'est-à-dire des décalages spectraux différents. Dans cette hypothèse, les objets observés comme étant les plus « distants », comme les quasars et les amas de galaxies lointains, ne seraient que les images multiples de sources plus proches, par un effet de mirage topologique dû à la forme même de l'espace. À la différence du mirage gravitationnel, l'espace joue lui-même le rôle de lentille, de sorte que les séparations angulaires et radiales entre les images topologiques se mesureraient généralement par de grandes fractions de π et du rayon de l'horizon respectivement, contrairement aux écarts que l'on rencontre dans les lentilles gravitationnelles, qui se mesurent respectivement en secondes d'arc et en fractions d'année-lumière.

Pour l'instant, les modèles d'espaces chiffonnés plats et hyperboliques sont tout aussi consistants avec les observations sur des échelles comprises entre 3 et 50 milliards d'années-lumière que les modèles correspondants simplement connexes. Des contraintes interdisant un espace chiffonné de taille inférieure entre 3 et 12 milliards d'années-lumière (la limite inférieure dépendant des autres paramètres cosmologiques) ont été avancées par plusieurs groupes, en réalité elles sont davantage liées aux hypothèses qui sont faites sur la statistique des perturbations qu'à la topologie elle-même. Les méthodes de détection expérimentale de la topologie sont encore en phase de perfectionnement, et chacun cherche la stratégie réaliste optimale pour y parvenir.

En 1999, Jean-Philippe Uzan, Roland Lehoucq et moi-même avons développé une méthode statistique qui devrait permettre de déceler sans ambiguïté une topologie « chiffonnée » de l'espace. Cette méthode, dite de *cristallographie cosmique*, tente de repérer dans la distribution tridimensionnelle des objets célestes lointains des corrélations spécifiques qui signaleraient des répétitions de structures analogues à celles des cristaux. Nous avons particulièrement étudié les espaces hyperboliques finis de petit volume, repliés sur eux-mêmes grâce à une topologie complexe, ce qui aurait pour effet de démultiplier les images des galaxies lointaines, faisant paraître

l'espace observable plus grand que l'espace réel. En effet, si l'Univers est à courbure négative, l'élément de volume spatio-temporel augmente rapidement avec la distance, de sorte que même si le volume de l'Univers est proche de celui de l'horizon, de nombreuses « copies » de l'Univers peuvent s'insérer à l'intérieur du volume observable. De plus, si la densité totale de l'Univers est $\Omega = 0,3$, l'échelle de courbure est suffisamment petite pour laisser place à un nombre gigantesque de topologies différentes, toutes ayant des volumes propres significativement plus petits que le volume propre de l'horizon.

Parallèlement, plusieurs équipes anglo-saxonnes se sont penchées sur la question topologique et ont proposé de tester les modèles d'univers chiffonné en analysant certaines corrélations de température dans le fond diffus cosmologique. Si, par exemple, l'Univers est un tore tridimensionnel, alors deux directions différentes du ciel pointent vers le même point de l'espace, et il y doit y avoir des corrélations observables entre les températures du fond diffus cosmologique mesurées à des positions angulaires différentes. Comme la surface de dernière diffusion (lieu des points où fut émis le fond diffus cosmologique à $z \sim 1100$) est sphérique, des *paires de cercles corrélés* le long desquels les profils de température seraient identiques se révéleraient sur les cartes du fond diffus cosmologique, à condition qu'une longueur caractéristique de l'espace soit plus petite que l'horizon.

Les méthodes tridimensionnelles de cristallographie et les méthodes bidimensionnelles utilisant le fond diffus cosmologique se complètent et sont en compétition à la fois. La résolution angulaire des données actuelles (COBE) est insuffisante pour détecter d'éventuelles paires de cercles corrélées. Les programmes futurs d'observation du fond diffus cosmologique à haute résolution (BOOMERANG, MAP et PLANCK), ainsi que le développement de sondages tridimensionnels profonds à différentes longueurs d'onde (SDSS, XMM) devraient permettre au cours des prochaines années de détecter un éventuel signal topologique et d'en déduire la véritable nature de l'espace. Nous avons par ailleurs démontré comment l'analyse du signal topologique pouvait conduire à une détermination précise des paramètres de courbure traditionnels. Par exemple, la détection de 5 à 10 images topologiques d'un même objet jusqu'à un décalage spectral $z \sim 2$ serait suffisante pour estimer respectivement Ω_m et Ω_Λ à mieux que 1 % et 10 %.

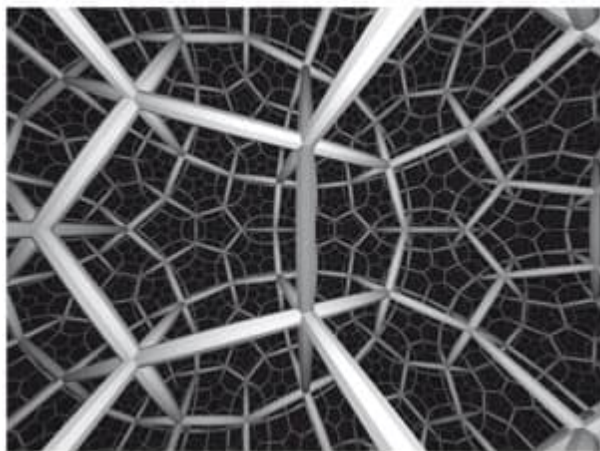
Ainsi, aux questions : quelle est la forme globale de l'espace, est-il fini ou infini, est-il orienté ou non, a-t-il des trous ou non ?, le temps où théorie et observations pourront fournir une réponse claire est peut-être proche, scellant par la même occasion notre connaissance du

destin ultime du cosmos : expansion perpétuelle ou contraction.

Conclusion

Georges Lemaître aurait sans doute apprécié que le mot de la fin revînt au poète. Je terminerai donc par une citation littéraire extraite d'une nouvelle bien connue de Jorge Luis Borges, « La bibliothèque de Babel ». L'intuition de l'écrivain préfigure l'illusion d'optique qui serait créée si nous vivions dans un univers chiffonné de petite taille :

« L'Univers (que d'autres appellent la Bibliothèque) se compose d'un nombre indéfini, et peut-être infini, de galeries hexagonales, avec au centre de vastes puits d'aération bordés par des balustrades très basses. De chacun des hexagones, on aperçoit les étages inférieurs et supérieurs, interminablement. La distribution des pièces est invariable. Dans le couloir il y a une glace, qui double fidèlement les apparences. Les hommes en tirent conclusion que la Bibliothèque n'est pas infinie ; si elle l'était réellement, à quoi bon cette duplication illusoire ? »



Structure apparente créée par un espace dodécaédrique de courbure négative (dit de Seifert-Weber).

De volume fini, relativement petit par rapport aux valeurs habituellement évoquées en cosmologie, il serait peuplé d'un nombre limité de galaxies. Mais le jeu de la multiconnexité de l'espace offrirait de ces galaxies un nombre quasi illimité d'images, parfois qualifiées de « fantômes ». Plus encore que les mirages gravitationnels, les mirages topologiques nous plongeraient dans une vaste illusion d'optique, nous faisant paraître l'espace plus vaste qu'il n'est en réalité.

1- Article publié en 2000 dans la revue *Ciel et Terre* (vol. 116, mars-avril).

2- J.-P. Luminet, *L'Invention du Big Bang*, suivi de *Friedmann, Lemaître : Essais de cosmologie*, Paris, Seuil, « Sources du savoir », 1997.

3- M. Lachièze-Rey et J.-P. Luminet, « Cosmic topology, *Physics Reports*, 1995, 254, p. 135-214 (pour spécialistes seulement).

Figures du ciel¹

Lorsqu'on sort par une belle nuit sombre et que l'on contemple le fourmillement des étoiles, on ne peut qu'être ému par le spectacle. Dès l'Antiquité, les hommes ont levé les yeux vers le ciel et ont été fascinés à la fois par la beauté de la nuit étoilée mais aussi par son mystère. Ils ne se doutaient pas que les quelques milliers d'étoiles que l'on peut voir à l'œil nu, par une nuit bien noire, ne représentent en fait que la banlieue extrêmement proche de notre modeste système solaire, lui-même un petit groupe de corps qui gravitent autour d'une étoile : le Soleil. Cela ne les empêcha pas de commencer à faire de la cosmologie très tôt.

Imaginons maintenant que l'œil humain soit remplacé par détecteur de lumière formidablement plus développé, par exemple un très grand télescope en orbite au-dessus de l'atmosphère terrestre, comme c'est le cas du télescope spatial Hubble, qui sonde d'un œil très perfectionné les profondeurs du cosmos. Au lieu de regarder avec un très large champ de vision qui est celui de nos yeux, ce télescope est capable de se concentrer sur un coin de ciel infime qui équivaldrait au chas d'une aiguille tendue à bout de bras. Lorsqu'on braque cet œil extraordinaire vers un tel petit coin de ciel, que voit-on ? Un paysage très beau, comme si on regardait entre les étoiles, comme si, en regardant attentivement à travers les arbres d'une forêt, on apercevait d'autres forêts lointaines. On découvre des systèmes analogues à notre propre galaxie, rassemblant chacun plusieurs milliards, voire plusieurs centaines de milliards d'étoiles, qui sont à des distances considérables, des galaxies de toutes les formes et de toutes les couleurs. À première vue, on ne parvient pas à différencier les objets proches de ceux qui sont lointains. Il y a comme un écrasement de la perspective, mais on peut soupçonner que les objets les plus brillants sont statistiquement les plus proches, et que les objets les plus faibles sont les plus lointains.

On observe ainsi l'Univers sur une très grande échelle d'espace, mais aussi sur une grande échelle de temps. La cosmologie fait, en quelque sorte, « s'emmêler » l'espace et le temps, dans la mesure où la majeure partie de l'information que l'on reçoit nous vient des rayons

lumineux, qui voyagent à une vitesse finie. Par conséquent, dès que l'on observe loin dans l'espace, on observe loin dans le passé. Lorsqu'on sonde l'espace relativement proche, le décalage réel par rapport à notre époque contemporaine ne se mesure qu'en quelques années, parce que les distances se mesurent en années-lumière et, à ces échelles, les durées de vie des étoiles sont très longues. En revanche, on commence à plonger vraiment, non seulement dans l'histoire, mais aussi dans le passé de l'Univers, en observant des galaxies distantes de, disons, 100 millions d'années-lumière. Le décalage commence à devenir important par rapport à nos échelles de vie humaines, cependant il reste faible à l'échelle de la durée de vie des galaxies, qui atteint plusieurs milliards d'années.

Les galaxies les plus faibles et les plus lointaines, ces petits grains que l'on peut voir sur le cliché du télescope spatial, représentent des galaxies qui sont, elles, à plusieurs milliards d'années-lumière. Cela signifie qu'elles ont émis leur lumière voici plusieurs milliards d'années. On voit alors un univers extraordinairement ancien par rapport à notre univers contemporain. Là seulement, nous sommes vraiment au royaume de la cosmologie, dans les profondeurs de l'espace et du temps.

La cosmologie a connu ainsi un bouleversement fondamental au début du XX^e siècle. Auparavant, on ne disposait pas d'instrument astronomique assez puissant pour sonder les profondeurs lointaines de l'espace ; on ne percevait que les étoiles proches, et l'on n'accédait pas vraiment à l'échelle cosmologique. On peut dire que la cosmologie scientifique moderne est née au début du XX^e siècle par la conjonction de deux révolutions : l'une théorique et l'autre expérimentale.

La révolution théorique, c'est l'avènement de la théorie de la relativité générale, élaborée par Albert Einstein et vite développée par les plus brillants savants européens. La deuxième révolution est de nature expérimentale. Grâce à de riches mécènes, les États-Unis ont commencé à se doter de très puissants télescopes, qui ont permis de faire des observations que l'on ne pouvait pas faire en Europe. Ils ont pu sonder pour la première fois le ciel profond. De nombreuses équipes y ont travaillé, mais l'astronome le plus connu de cette époque s'appelait Edwin Hubble (1889-1953). On lui doit plusieurs avancées capitales ; c'est notamment lui qui a prouvé l'existence de galaxies extérieures à la nôtre. Éparpillés parmi les innombrables points qui sont autant d'étoiles relativement proches appartenant à notre galaxie, se trouvent des astres flous appelés des nébuleuses. Les nébuleuses avaient déjà été repérées aux XVII^e et XVIII^e siècles, mais on ignorait tout de leur nature. L'une des questions fondamentales était de savoir si les nébuleuses étaient des amas d'étoiles ou des nuages de gaz relativement proches de nous, c'est-à-dire appartenant à notre Voie

lactée, ou s'ils étaient, comme certains en avaient déjà fait l'hypothèse, des « univers-îles », c'est-à-dire des galaxies à part entière, analogues à notre propre galaxie, mais situées extrêmement loin dans l'espace.

Edwin Hubble a effectué des mesures permettant de démontrer que notre univers n'était pas peuplé d'une galaxie unique, la nôtre, mais d'un nombre extraordinairement grand de galaxies. Des millions, voire des milliards. On estime aujourd'hui qu'il existe 100 milliards de galaxies dans l'univers observable. Chacune d'entre elles regroupe entre quelques dizaines et quelques centaines de milliards d'étoiles.

Donc, première avancée cosmologique : la découverte d'un Univers vaste, peuplé à peu près uniformément de galaxies. La deuxième avancée, encore plus fondamentale, a eu lieu lorsque les astronomes se sont intéressés non plus à la nature et à la distance des nébuleuses, mais à leurs mouvements. En utilisant les techniques de la spectroscopie et en appliquant une loi physique appelée effet Doppler-Fizeau, on est capable de déterminer si un astre se rapproche ou s'éloigne de nous en mesurant son spectre.

Le spectre d'un objet céleste, c'est sa lumière étalée selon ses différentes fréquences et ses différentes longueurs d'onde. Un spectre typique est barré par un ensemble de raies sombres ou claires selon que la lumière est absorbée ou réémise. Le spectre d'un objet céleste ressemble à une sorte de code-barres et représente une véritable carte d'identité ; il n'y a pas deux spectres qui soient identiques. Les raies signalent la présence d'éléments chimiques, reflet de la composition chimique des astres que l'on observe. L'effet Doppler-Fizeau dit que si un astre s'éloigne de l'observateur, l'ensemble de son spectre va être décalé vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire « vers le rouge ». Si au contraire l'objet se rapproche de nous, son spectre va être décalé « vers le bleu », c'est-à-dire vers les courtes longueurs d'onde. C'est un moyen imparable pour déterminer si les astres s'approchent ou s'éloignent de nous.

Quand cette technique a été appliquée aux galaxies, à la fin des années 1920, on aurait pu s'attendre *a priori* à ce que, statistiquement, 50 % des galaxies se rapprochent et 50 % des galaxies s'éloignent. La grande surprise a été de découvrir que les spectres des galaxies étaient systématiquement décalés vers le rouge, ce qui – en termes de cet effet Doppler-Fizeau – signifiait qu'elles devaient toutes s'éloigner de l'observateur terrestre. C'était un phénomène de prime abord surprenant. Comment l'interpréter ? Fallait-il revenir à une vision anthropocentrique, où notre galaxie aurait occupé une position privilégiée au centre de l'Univers, toutes les autres galaxies s'éloignant d'elle ? En outre, ces observations indiquaient que les spectres étaient d'autant plus décalés que les galaxies étaient plus lointaines. Les

vitesse de fuite étaient donc d'autant plus grandes que les astres étaient plus éloignés.

Pour comprendre ce phénomène correctement, il fallait en fait revenir à l'avancée théorique majeure qui avait été accomplie, une dizaine d'années auparavant, par la théorie de la relativité générale développée par Einstein. C'est une théorie de la gravitation qui se substitue à l'ancienne vision newtonienne de la gravitation en termes d'attraction universelle. La physique newtonienne, qui a connu des succès remarquables pour expliquer entre autres les lois de la mécanique céleste, est utilisée encore aujourd'hui dans beaucoup de circonstances pour décrire nombre de phénomènes physiques. Elle s'est cependant révélée imparfaite, et il a fallu la remplacer par une théorie meilleure.

Pourquoi la relativité générale sert-elle à faire de la cosmologie ? Parce que l'organisation de l'Univers à grande échelle est gouvernée par la gravité, et qu'il faut une théorie de la gravitation pour élaborer un modèle scientifique du cosmos dans son ensemble.

Dans quelle mesure la théorie de la relativité a-t-elle changé la vision que l'on se faisait de l'organisation de l'Univers et des fondements mêmes qui le constituent, c'est-à-dire la nature de l'espace, du temps et leur interaction avec la matière ? Avant Einstein, on considérait qu'il existait un espace donné *a priori*, un espace absolu car indépendant de nous, un espace éternel inscrit dans un temps éternel. Cet espace était décrit par un modèle géométrique dont nous avons tous appris les règles à l'école : la géométrie euclidienne. C'est un espace qui n'a pas de courbure – de sorte que les rayons lumineux se propagent en ligne droite –, et qui s'étend à l'infini.

Dans cette vision d'un espace absolu donné *a priori*, comment expliquer la gravitation, c'est-à-dire le fait qu'autour d'un corps céleste comme le Soleil, qui n'influe pas du tout sur la structure de l'espace, les corps célestes comme les planètes et les comètes ont des trajectoires elliptiques, au lieu d'épouser naturellement la forme de l'espace, c'est-à-dire d'aller en ligne droite ? Newton a dû introduire un concept supplémentaire empêchant les corps de se mouvoir en ligne droite au voisinage des astres massifs. Il s'agit d'une force qui retient les corps : la force d'attraction universelle. La théorie de Newton a très bien fonctionné pour prédire le retour des comètes, calculer l'existence et la position de nouvelles planètes, etc.

Cependant, la théorie newtonienne a montré ses limites, et Einstein a été conduit à proposer une vision radicalement différente sur la nature de l'espace, du temps et de la gravité. Selon la relativité générale, tout corps massif imprime dans son voisinage, c'est-à-dire dans la géométrie même de l'espace et du temps, une courbure. Celle-ci induit une déformation du « tissu élastique » de l'Univers qui se

visualise par les trajectoires des rayons lumineux. En effet, les rayons lumineux épousent toujours la forme de l'espace. Si ce dernier n'a pas de courbure, ils vont en ligne droite, si l'espace est courbe les rayons lumineux suivent cette courbure. La théorie de la relativité générale prédit en particulier que les rayons lumineux passant au voisinage des astres massifs doivent être déviés de leur trajectoire normalement rectiligne, un phénomène qui a été assez rapidement vérifié en 1919 lors d'une éclipse totale de soleil. La relativité générale permet ainsi d'expliquer les trous noirs, c'est-à-dire l'existence de « puits d'espace-temps » si profonds que la matière et la lumière qui y tombent ne peuvent pas s'en échapper, ainsi que les mirages gravitationnels, c'est-à-dire des illusions d'optique créées par la démultiplication des trajets de la lumière dans un espace courbe.

Que nous dit la cosmologie relativiste, fondée sur cette nouvelle conception de l'espace et du temps ? L'effet prévu et calculé par les équations de la relativité est qu'une distribution uniforme de corps courbe non seulement l'espace, mais provoque également sa dilatation ou sa contraction en chacun de ses points.

La première personne à l'avoir compris est Georges Lemaître (1894-1966). Einstein, lorsqu'il avait élaboré en 1917 un premier modèle cosmologique fondé sur ses équations, n'avait pas vu cet effet de dilatation temporelle. C'est Lemaître qui, avec le physicien russe Alexandre Friedmann, a compris que la relativité générale prédisait naturellement que l'espace devait être dynamique, et non pas statique, figé. Or qu'observait-on à l'époque ? Une fuite apparente des galaxies. Selon Lemaître, l'interprétation relativiste de ce phénomène n'est pas que les galaxies s'éloignent de nous par un mouvement propre, mais c'est l'espace contenant les galaxies qui se dilate. Les équations de la relativité donnaient donc une justification théorique à ces observations. Ce fut le début de la cosmologie dite relativiste.

Si l'on considère n'importe quel volume d'espace, il augmente au cours du temps de façon naturelle : c'est l'expansion de l'Univers. Si l'on se transportait en pensée sur une autre galaxie pour effectuer les mêmes mesures sur les mouvements des galaxies, on verrait également les galaxies fuir de tous côtés, car l'Univers n'a pas de centre ni de bord ; l'espace se dilate en chacun de ses points.

Lemaître, qui avait une vue particulièrement aiguisée des phénomènes cosmologiques, a su reconnaître le film de l'évolution cosmique. Il a découvert que si l'on remontait le film à l'envers, on arriverait au début de l'expansion, c'est-à-dire à une époque où tous les points de l'espace étaient séparés par des distances tendant progressivement vers zéro. Georges Lemaître a émis ainsi deux idées révolutionnaires : la première, c'est que ce ne sont pas les galaxies qui fuient autour de nous, mais l'espace qui est partout en expansion ; la

deuxième, c'est qu'en extrapolant le film de l'expansion cosmique dans le passé, on tombe nécessairement sur une origine de l'Univers, une sorte de point singulier où toutes les séparations spatiales entre les points de l'Univers tendent vers zéro. C'est ce qu'on appelle le Big Bang.

Ce concept de *naissance de l'espace* (1931) a suscité beaucoup de réticence de la part de la communauté scientifique, au premier rang de celle-ci se trouvant Albert Einstein, le père de la théorie qui avait permis cette découverte fondamentale. Il s'est très longtemps opposé à cette idée d'origine singulière de l'espace et du temps. C'est pourtant Lemaître qui avait raison.

Quand on résout les équations de la relativité en faisant l'hypothèse d'une distribution uniforme de matière, on découvre des solutions cosmologiques permettant de représenter l'évolution de l'espace au cours du temps. Comme l'espace est courbé de façon uniforme par la distribution elle-même uniforme de matière, sa courbure est partout la même, et il existe seulement trois cas géométriquement possibles : celui où l'espace a une courbure positive, appelé hypersphère ; un autre, plus simple, dans lequel l'espace a une courbure nulle (c'est l'espace euclidien) ; et enfin, un espace courbé négativement, appelé espace hyperbolique.

En ce qui concerne l'aspect temporel, il y a également trois cas de figure : l'un dans lequel, à partir de l'origine singulière de l'Univers, l'espace est initialement en expansion, atteint ensuite un rayon d'expansion maximal, puis s'effondre sur lui-même. C'est un modèle d'univers dit fermé, dans lequel l'espace est de volume fini et l'histoire temporelle de cet univers est également finie : elle commence dans un Big Bang et s'achève dans un « Big Crunch ». Dans les autres cas de figure, on a une expansion perpétuelle, donnant un modèle « ouvert ». Il y a deux possibilités : soit l'expansion se poursuit perpétuellement mais en ralentissant progressivement, soit l'expansion finit par accélérer au cours du temps.

Ces modèles cosmologiques ont été découverts au début des années 1930. Depuis soixante-dix ans, les cosmologistes s'attachent à déterminer dans quel cas de figure l'Univers réel se trouve. La problématique de la cosmologie est donc la suivante : nous savons que l'Univers est actuellement en expansion, mais quel est son destin futur ? Expansion-contraction, ou bien expansion perpétuelle ? L'autre grande question de la cosmologie concerne la reconstitution du passé, c'est-à-dire la compréhension des événements proches du Big Bang.

La relativité générale donne en principe le moyen expérimental de déterminer le destin de l'Univers, en mesurant la quantité moyenne de matière et d'énergie présentes dans l'Univers. C'est en effet la distribution de matière et d'énergie qui sculpte le tissu élastique de

l'espace-temps, qui lui confère sa courbure et sa dynamique, c'est-à-dire son histoire temporelle. Il existe une densité critique, valeur calculée par la théorie, et les propriétés de l'Univers changent radicalement selon que la densité réelle se situe en dessus ou en dessous de cette densité critique. Depuis plusieurs décennies, les cosmologistes essaient donc de recenser la quantité d'énergie et de matière dans l'Univers, pour savoir dans quel cas de figure nous nous trouvons.

À première vue, on peut commencer par compter les galaxies. L'Univers est rempli à profusion de galaxies ; pourtant, lorsqu'on comptabilise tous ces astres visibles détectés avec de puissants télescopes, on obtient une densité de masse cent fois plus faible que la densité critique. En fait, il n'existe évidemment pas que de la matière visible, il existe aussi de la matière invisible, dite sombre. Il y a par exemple des trous noirs, des étoiles trop peu massives pour émettre du rayonnement, de grands nuages d'hydrogène moléculaire froids, etc. L'une des façons de recenser les quantités de matière sombre consiste à analyser ces paysages cosmiques étonnants que sont les « mirages gravitationnels ». Il s'agit d'illusions d'optique cosmiques qui sont engendrées par la courbure de l'espace au voisinage des grandes masses. On peut facilement imaginer une sorte de « lentille gravitationnelle » qui déforme l'espace dans son voisinage et démultiplie les trajets des rayons lumineux venant de l'arrière-plan. Plus la lentille est massive, plus les déformations sont grandes. L'analyse précise de la disposition des images multiples d'un mirage gravitationnel permet donc de déterminer la quantité totale de matière qui compose la lentille.

Ces méthodes permettent de mesurer que dans les amas de galaxies, il y a au moins trente fois plus de matière sombre que de matière visible ! C'est un changement de perspective étonnant, dans la mesure où l'on a l'impression que l'Univers est abondamment peuplé de galaxies lumineuses, alors que celles-ci ne représentent que l'infime « partie émergée de l'iceberg cosmique ».

Les dernières mesures (à partir de 1998) permettent d'affiner la répartition entre les diverses formes de matière et d'énergie. Une nouvelle méthode consiste non pas à recenser la quantité de matière, mais à mesurer directement la géométrie de l'espace. L'espace euclidien, qui n'a pas de courbure, est caractérisé par le fait que la somme des angles d'un triangle est toujours égale à 180 degrés. Au contraire, si un espace est courbé positivement, la somme des angles d'un triangle est supérieure à 180 degrés, et s'il est courbé négativement, la somme des angles est inférieure. Supposons donc que nous puissions mesurer la somme des angles d'un très grand triangle cosmique : si elle s'écarte de 180 degrés, on saura que l'espace

physique est soit courbé négativement, soit positivement.

On a effectué de telles mesures, portant sur un gigantesque triangle cosmique d'environ 15 milliards d'années-lumière de côté. Il s'avère d'une part que la géométrie de l'espace n'est pas loin d'être euclidienne, d'autre part que l'Univers est en expansion perpétuelle qui s'accélère au cours du temps. Actuellement nous commencerions à mesurer les effets de cette accélération cosmique.

L'une des implications spectaculaires est que, pour que l'Univers soit en expansion accélérée, il faut qu'il y ait une contribution particulière à sa densité d'énergie ne se présentant ni sous forme d'étoiles ou de galaxies, ni sous forme de matière atomique sombre, ni même sous forme de particules élémentaires exotiques. Cette contribution particulière, appelée par Lemaître « constante cosmologique », peut s'interpréter physiquement comme l'« énergie du vide ». Elle semble jaillir naturellement des théories modernes sur l'unification des interactions fondamentales. Les mesures cosmiques indiquent que dans l'énergie totale de l'Univers, un tiers seulement est occasionné par l'ensemble de toutes les formes de matière, et les deux tiers, c'est-à-dire l'essentiel, sont sous forme d'une énergie « impalpable » qui a pour effet d'accélérer l'expansion de l'espace. La dynamique de l'Univers serait ainsi gouvernée, selon les dernières données, par l'énergie du vide !

Maintenant que nous avons une réponse au destin futur de l'Univers, passons à la reconstitution de son passé.

L'observation astronomique nous incite tout naturellement à le faire, puisqu'en observant l'univers extrêmement lointain, on plonge dans les profondeurs du passé en raison de la finitude de la vitesse de la lumière. Il existe des galaxies si lointaines qu'elles nous donnent à voir un univers jeune de moins de 1 milliard d'années, au moment où les galaxies étaient en train de se former. Mais peut-on remonter à l'origine même de l'Univers, ou du moins au début de son expansion, c'est-à-dire au Big Bang ? Selon les différentes mesures qui ont été effectuées, le Big Bang est daté d'environ 14 milliards d'années dans le passé.

Il serait idéal d'observer des astres à 10 milliards d'années dans le passé, puis à 11 milliards, puis à 12 milliards, etc., pour se rapprocher constamment du Big Bang. Mais vous imaginez bien que les galaxies n'existent pas de toute éternité. L'Univers n'est pas né avec toutes ses étoiles et toutes ses galaxies déjà formées, il a connu toute une évolution. En tentant d'observer de plus en plus loin dans le passé, il arrive forcément un moment où l'on ne voit pas de galaxies, parce que tout simplement elles n'existaient pas encore !

Jusqu'où porte la reconstitution du passé de l'Univers par l'observation astronomique ? Cette reconstitution « directe » permet de

retracer une époque où l'Univers était jeune de 300 000 ans seulement. Et que voit-on ? La première lumière qui a été émise par l'Univers ! Ce rayonnement n'appartient pas au domaine visible, il est dans le domaine des ondes radio, plus précisément celui des micro-ondes ; on l'appelle le « rayonnement de fond cosmologique ». Il baigne l'ensemble de l'espace, et nous parvient de toutes les directions du ciel parce qu'il n'est pas localisé en un point précis de l'espace. Il appartient à notre passé, lorsque l'Univers n'avait que 300 000 ans.

La théorie nous apprend qu'auparavant, l'Univers était tellement dense qu'il en était opaque. Imaginons-le comme une sorte de soupe primitive, un mélange de particules élémentaires de très haute énergie mêlées à des rayonnements. Cette soupe était tellement dense que les photons – corpuscules de lumière – étaient piégés dans la matière. En se dilatant, au bout de 300 000 ans d'expansion, l'Univers est devenu subitement transparent, et la première lumière a pu se propager indépendamment de la matière. Ce rayonnement semble provenir d'une grande sphère située aux confins de l'espace observable. Il est l'écho du rayonnement qui a été émis par l'Univers lorsqu'il était à très haute température. Ce rayonnement a voyagé dans l'espace et dans le temps et nous parvient aujourd'hui.

La température moyenne de ce rayonnement est connue avec une très grande précision, de l'ordre du 1/100 000 de degré : elle est de 2,73 degrés sur l'échelle absolue de températures (ce sont les degrés Kelvin), ce qui correspond à $-270^{\circ}\text{Celsius}$. La température de l'Univers aujourd'hui est assez basse, mais elle est le vestige refroidi d'une époque où l'Univers était mille fois plus chaud.

La température du rayonnement de fond est extrêmement uniforme, mais nous l'observons avec une telle sensibilité que nous sommes capables d'en mesurer les très légers excès et déficits. Imaginons une soupe très homogène mais agitée d'infimes frémissements, des « grumeaux » correspondant aux petits excès de densité de la soupe primitive : on voit là les embryons de tout ce qui existe aujourd'hui dans l'Univers. En effet, toutes les structures astronomiques, des étoiles aux superamas de galaxies, sont le produit ultime de ces minuscules fluctuations initiales, que l'on observe directement dans le rayonnement de fond.

À partir de là, il est possible de reconstituer l'histoire de la matière, visible et invisible, comme si l'on visionnait une succession d'écrans. Au bout de 1 milliard d'années, vous imaginez que les grumeaux se condensent, forment les premières galaxies, qui s'associent ensuite en amas de galaxies et en super-amas. Toutes les structures de l'Univers découlent de cette évolution, notre propre système solaire s'étant formé relativement tard, voici 5 milliards d'années, c'est-à-dire 10 milliards d'années après l'émission du

rayonnement de fond.

Voilà les prédictions assez fortes du modèle de Big Bang qui permettent de broser un panorama extrêmement cohérent, et vérifié expérimentalement, jusqu'à une époque aussi reculée que 300 000 ans après le Big Bang. Bien évidemment, les cosmologistes espèrent remonter au-delà de ces 300 000 années. Ils n'y accèdent pas directement par le rayonnement électromagnétique, puisque celui-ci ne « sort » pas des 300 000 premières années de l'Univers. On utilise donc d'autres techniques pour tenter de reconstituer l'histoire de l'univers primordial, des techniques qui font appel à la physique des hautes énergies, car l'univers primordial était très chaud, très dense, rempli de particules élémentaires. Ces conditions peuvent être reconstituées en laboratoire à l'aide des accélérateurs de particules ; de telles expériences s'effectuent notamment au CERN, où l'on fait entrer en collision des particules à une vitesse proche de la vitesse de la lumière. On recrée alors des énergies extraordinairement élevées, que l'univers primitif est censé avoir connues dans ses premiers instants.

Jusqu'où peut aller la reconstitution de l'univers primitif par ces moyens expérimentaux ? Une première étape est assez bien établie : la nucléosynthèse primordiale. Ce mot signifie simplement la synthèse des premiers noyaux ; il s'agit des noyaux atomiques des éléments dits « légers » : le deutérium (un isotope de l'hydrogène comprenant un proton et un neutron), l'hélium 4 (deux protons et deux neutrons), son isotope hélium 3 (deux protons, un neutron), et le lithium. La théorie du Big Bang prédit que ces éléments légers ont dû se former à une époque où la température moyenne de l'Univers était d'un milliard de degrés, ce qui, sur l'échelle de temps, implique une période de quelques minutes d'expansion. Au bout de ce temps, l'Univers s'était déjà refroidi à un milliard de degrés pour former les premiers noyaux des éléments légers. Ceux-ci existent encore aujourd'hui, avec des proportions qui sont le reflet des proportions initiales dans lesquelles ils se sont formés.

Il suffit donc de mesurer dans notre environnement lointain – par la spectroscopie – les proportions d'hélium et de deutérium pour connaître les paramètres de l'univers primordial. L'accord extrêmement bon entre les prédictions du modèle du Big Bang et les observations permet de confirmer expérimentalement la validité du modèle jusqu'à l'époque de la nucléosynthèse.

Peut-on remonter plus loin ? Oui, car on peut créer des températures de l'ordre du million de milliards de degrés dans un accélérateur de particules comme celui du CERN. À cette température et à ces énergies, on voit surgir des particules élémentaires qui sont prédites par la physique des hautes énergies. D'une certaine façon, on

corroboire ainsi expérimentalement le modèle du Big Bang jusqu'à une époque où l'Univers était aussi chaud qu'un million de milliards de degrés, c'est-à-dire à un dix milliardième de seconde après le Big Bang. Pour l'instant, la vérification expérimentale du Big Bang s'arrête là ; on a reconstitué une histoire plausible de l'Univers au cours de ses 14 milliards d'années d'existence, à l'exception du premier dix milliardième de seconde !

Pourtant, l'essentiel est contenu dans ce dix milliardième de seconde, parce qu'il ne faut pas raisonner en temps mais en énergie. Quand on s'approche de l'hypothétique « temps zéro », on tend vers une énergie infinie et, par conséquent, on reste infiniment loin du Big Bang lui-même. Aujourd'hui, c'est le rôle des théories de la physique des très hautes énergies que de décrire les circonstances dans lesquelles l'espace et le temps auraient pu se former sur des échelles de temps plus brèves qu'un dix milliardième de seconde.

Je vais dire quelques mots sur cette quête de l'infiniment petit et des origines mêmes de l'Univers. Pour cela, il faut essayer de comprendre d'une façon unitaire l'ensemble des interactions qui gouvernent l'Univers à toutes les échelles : les forces fondamentales. On est alors obligé de faire exploser le cadre physique dans lequel on travaillait précédemment, c'est-à-dire le cadre de la relativité générale et celui de la physique quantique – l'autre pilier de la physique, qui s'intéresse à la structure des particules élémentaires et à leurs interactions.

Les théories unitaires sont en cours de recherche dans les laboratoires. Il y a plusieurs voies d'approche, et pour l'instant, aucune ne convainc complètement la communauté des physiciens parce que les théories ne sont pas encore achevées. Il est toutefois intéressant de voir que dans ces nouvelles théories qui permettraient d'expliquer les tout premiers instants de l'Univers, il faut encore changer radicalement le paysage d'espace et de temps qui avait été forgé par la relativité. Parmi les nouvelles idées, il y a celle de l'« écume de l'espace-temps » : si vous regardez la surface d'un océan à haute altitude, vous pouvez considérer que c'est une surface relativement lisse ; si vous vous en rapprochez, vous commencez à voir une surface cabossée. Géométriquement, c'est un peu compliqué à décrire, mais cela reste un espace continu. Par contre, si vous êtes à la surface même de l'océan, vous vous apercevez qu'elle est extraordinairement compliquée, non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps. L'océan n'est plus d'un seul morceau, des gouttes se détachent, il y a des vagues qui fluctuent en permanence, il y a l'écume. Vous ne pouvez pas faire de prédictions précises, vous ne pouvez faire que des prédictions probabilistes.

C'est une analogie très métaphorique sur la façon dont certains

physiciens envisagent la structure intime de l'espace et du temps. Admettons que l'on puisse observer la vraie nature de l'espace et du temps sur des grains d'espace aussi petits que 10^{-33} centimètre, une sorte de longueur minimale ; on s'apercevrait que l'espace-temps microscopique est encore beaucoup plus compliqué que l'espace-temps courbe de la relativité générale. Il serait granulaire, complètement quantique, en fluctuation permanente, et il serait impossible de faire dessus des prédictions autres que probabilistes. Il faudrait donc élaborer une théorie de la gravitation qui serait quantique, une sorte de couplage entre l'infiniment grand et l'infiniment petit.

On est allé assez loin dans ces théories d'unification. Certaines expliquent que l'espace-temps est fondamentalement instable, et que sur de très courtes échelles de temps, il a tendance à exploser spontanément. Quand je parle de l'espace-temps, ce n'est pas vraiment l'espace-temps qui a tendance à exploser, c'est le vide. J'en reviens au vide dont je parlais tout à l'heure : qu'est-ce que le vide ? Normalement, c'est l'absence de toute chose : vous prenez une boîte, vous enlevez les particules et les rayonnements. Dans la physique traditionnelle, il ne reste rien, mais dans la physique quantique, il reste quelque chose : de l'énergie à l'état pur, à son niveau minimal. Cette « énergie du vide » existe bel et bien, elle est prédite par la théorie et elle a été mise en évidence expérimentalement. La physique quantique nous apprend aussi que cette énergie a tendance à fluctuer spontanément.

Ce concept d'énergie du vide, appliqué à l'univers très primitif, suggère que le vide quantique, fondamentalement instable, a tendance à exploser, et que c'est une fluctuation spontanée du vide quantique qui aurait engendré l'Univers : l'espace, le temps et la matière. Le vide quantique n'est inscrit ni dans l'espace ni dans le temps. Il est semblable à un océan d'énergie qui bouillonne, avec de grosses fluctuations qui engendrent des univers à part entière. Dans ce schéma, un univers serait une goutte de l'écume du vide. Il n'y aurait pas un seul univers, le nôtre, il y aurait un « multivers », c'est-à-dire une multitude de bulles d'univers toutes jaillies du vide quantique, chaque bulle ayant ses propres lois de la physique et évoluant différemment. Cette théorie soulève évidemment quantité d'interrogations philosophiques et métaphysiques sur la définition de ce qu'est l'Univers. S'il n'est plus unique, on peut espérer avoir accès à ces autres bulles d'univers.

Je voudrais maintenant parler de mes dernières recherches, concernant une autre grande question de la cosmologie, une question aussi vieille que le monde qui porte sur la forme globale de l'Univers, notamment le fait qu'il soit fini ou infini. Autour de nous, l'espace

physique est bien décrit par la mécanique classique et la géométrie euclidienne que nous avons apprises à l'école : l'espace n'a pas de courbure. Au niveau de la relativité générale et de la cosmologie, l'espace acquiert une courbure parce que les corps massifs courbent l'espace-temps. Je viens de décrire très brièvement et de façon très simpliste un troisième niveau, où la structure possible de l'espace-temps a une courbure qui serait fluctuante sur de très petites échelles.

Il y a un quatrième niveau, où l'on envisage cette fois la forme globale de l'espace. La forme globale pourrait être très compliquée par rapport à des aperçus extrêmement locaux ne montrant qu'un tout petit morceau d'une structure plus vaste. La discipline qui considère la forme globale de l'espace s'appelle la « topologie cosmique ». Elle a été assez longtemps négligée dans l'histoire de la cosmologie. Une des raisons de cet oubli est qu'à l'époque où la cosmologie relativiste s'est développée, la branche mathématique (la topologie) qui considère les formes possibles des espaces était quasiment inexistante. D'autre part, sur le plan observationnel, il n'y avait rien qui puisse indiquer que l'Univers dans sa globalité puisse avoir des trous et revêtir des formes bizarres.

Cette discipline a resurgi de ses cendres dans les années 1990, grâce à des progrès mathématiques importants, et à des observations astronomiques commençant à dévoiler des paysages de l'espace-temps sur des échelles extrêmement grandes. Il y a maintenant dix ans que je travaille sur ce domaine nouveau et tout à fait excitant de la topologie cosmique. Certains modèles dits d'« univers chiffonnés » ont des conséquences extrêmement étranges. Ces modèles entrent tout à fait dans le cadre de la théorie du Big Bang, mais ils s'intéressent à la forme même de l'espace. Est-il fini ou infini ? Ceci n'est qu'un aspect très partiel de la question de la forme globale de l'Univers car, qu'il soit fini ou infini, il peut revêtir des formes différentes. Le plan euclidien, par exemple, est infini, et l'espace hyperbolique est également infini, pourtant ils ont des formes différentes.

On peut élaborer des modèles où la forme de l'espace est tellement compliquée, froissée, « chiffonnée » (même si la métaphore n'est pas évidente), que cet espace nous plongerait dans une gigantesque illusion d'optique cosmique. Si l'espace est replié sur lui-même, les rayons lumineux épousent tous les plis de l'espace et empruntent plusieurs trajets pour aller d'un point à un autre. On dit que l'espace est multiconnexe, c'est-à-dire que deux points de l'espace sont connectés, non plus par un seul chemin, mais par plusieurs.

Si l'espace est chiffonné, les sources de lumière lointaines sont vues en plusieurs exemplaires. Il ne s'agit plus d'un de ces mirages gravitationnels dont je vous parlais tout à l'heure, mais d'un mirage topologique : c'est la forme même de l'espace qui cause cette illusion

d'optique. Chaque source lointaine, chaque galaxie a des images multiples distribuées dans toutes les directions du ciel. Vivant dans un espace de cette nature, on a l'illusion de vivre dans une sorte de cristal cosmique. On a une cellule fondamentale qui représente l'espace réel, avec un nombre réduit de galaxies ; mais on a l'illusion de vivre dans un espace beaucoup plus vaste, constitué de la juxtaposition d'un certain nombre de cellules qui se répètent, nous faisant voir un très grand nombre de galaxies, qui ne seraient que des images fantômes et démultipliées des galaxies originales.

Je peux donner une image assez simpliste et cependant frappante : celle d'une pièce fermée qui représente la forme de l'espace. Le Bon Dieu dit à un astronome : « Je vais te faire entrer dans cette pièce et tu vas me dire quelle en est la forme. » L'astronome pénètre dans la pièce qui est totalement noire, il demande à ce qu'elle soit éclairée parce que ce n'est que par l'analyse des rayons lumineux qu'il va pouvoir déterminer la forme de la pièce. Le Bon Dieu allume trois bougies, mais ce qu'il n'a pas dit à l'astronome, c'est que la pièce est entièrement tapissée de miroirs. L'astronome ne voit pas trois bougies mais des milliers, apparemment réparties dans un espace extrêmement grand. Il est en fait plongé dans une illusion d'optique, incapable de faire la part entre les bougies réelles et leurs multiples images fantômes ; il croit qu'il est dans un espace euclidien infini. Il est en fait dans un espace beaucoup plus petit, mais dont la structure démultiplie les trajets des rayons lumineux.

L'analogie est très simpliste car il ne faut pas croire que l'espace, s'il est chiffonné, possède des parois et des miroirs réfléchissants ; il n'a pas de bord ni de limite, mais sa topologie est telle que les rayons lumineux sont démultipliés comme dans un grand jeu de miroirs cosmique. Ces modèles d'univers chiffonnés ont été mis à l'épreuve des observations. On n'a pas encore de preuve directe que l'Univers est chiffonné, mais on n'en a pas non plus qu'il ne l'est pas. On a seulement des contraintes observationnelles sur la taille possible de l'Univers. L'Univers est peut-être chiffonné, mais il ne peut l'être sur une échelle trop petite, sinon on verrait des images fantômes de galaxies reconnaissables, ce qui n'a pas été observé. Cependant, il pourrait être aussi petit que 5 milliards d'années-lumière, ce qui, à notre échelle, est un grand espace, mais cependant plus petit que l'espace observé, puisque le rayon de l'univers observable dépasse 15 milliards d'années-lumière. Cependant l'univers observable n'est que celui des apparences, tissé par les rayons lumineux ; et si l'espace est multiconnexé, l'espace des apparences est différent de l'espace réel parce que les trajets des rayons lumineux sont démultipliés.

Si l'espace physique est aussi petit que 5 milliards d'années-lumière, des galaxies extrêmement lointaines comme les quasars ne

seraient pas des originaux mais des images fantômes de galaxies qui seraient plus proches, situées dans d'autres directions du ciel et à d'autres époques de leur histoire.

Pour tester ces modèles d'univers chiffonnés, il existe plusieurs méthodes. Certaines ont été développées avec mon équipe, comme les méthodes de cristallographie cosmique. On analyse la distribution des objets lointains (galaxies, amas, etc.), et si l'espace est chiffonné, on doit trouver certaines corrélations de distances entre les galaxies, comme dans un cristal où les atomes sont répartis non pas uniformément mais selon un canevas précis. Une autre méthode est aussi prometteuse, sinon plus ; elle va sans doute donner des résultats à partir de l'année prochaine. J'en reviens au rayonnement de fond cosmologique. Il y a actuellement un satellite en orbite, appelé MAP, qui mesure avec un très grand détail les fluctuations de température : si l'univers réel est plus petit que l'univers apparent, on devrait en principe voir des corrélations de température dans ces cartes².

Il faudra sûrement plusieurs années pour les analyser mais, dans l'avenir proche, on aura sans doute les moyens expérimentaux pour vérifier cette hypothèse apparemment assez surprenante. Elle s'intègre complètement et naturellement dans le cours de l'évolution des idées en cosmologie relativiste, puisqu'on ne fait qu'appliquer au modèle de Big Bang, assez bien établi, des modèles mathématiques parfaitement cohérents sur les formes possibles de l'espace.

Cela constitue l'objectif de ma recherche depuis quelques années. Pour récapituler, j'ai tenté de broser avec vous un panorama, bien que très incomplet et très partiel, de la cosmologie et de quelques-unes de ses grandes questions.

- Celle du destin futur de l'Univers, qui semble résolue par les observations récentes : nous serions dans un univers en expansion perpétuelle accélérée, avec une implication fondamentale : la contribution majeure à l'énergie cosmique, qui gouverne la structure et l'évolution de l'Univers, proviendrait du vide quantique.

- Celle de la reconstitution du passé très lointain de l'Univers, avec tout un ensemble de pistes de recherches pour essayer de comprendre toutes les interactions fondamentales dans un schéma unifié, avec une autre implication révolutionnaire : l'espace serait granulaire, ou posséderait des dimensions supplémentaires.

- Celle de la forme globale de l'espace : est-ce que l'espace observé est différent de l'espace réel, dans la mesure où ce dernier pourrait être chiffonné et nous plonger dans une illusion d'optique ?

Voilà quelques-unes des grandes questions de la cosmologie, dont certaines ont reçu une réponse partielle, et d'autres font encore l'objet de recherches ardues et passionnantes, qui se poursuivront pendant de nombreuses années.

1- Conférence donnée à Marseille le 31 janvier 2002 dans le cycle « Échange et diffusion des savoirs ».

2- Les données du satellite MAP ont été effectivement analysées en 2003, et appuient de façon spectaculaire un modèle précis d'espace chiffonné, dont la cellule fondamentale aurait la forme d'un dodécaèdre sphérique. Ce travail de l'auteur et de son équipe a fait la une de la célèbre revue *Nature* en octobre 2003 [*Note ajoutée pour la présente édition*].

L'espace chiffonné¹

Le président de l'Académie vient de me présenter aimablement comme chercheur, artiste et poète. Toutefois, je parlerai ce soir seulement en tant qu'astrophysicien. Il y aura peu de poésie dans mon intervention, même si vous trouvez peut-être que le titre de mon exposé, « L'espace chiffonné », a une connotation poétique. Je vous parlerai de science, plus précisément de cosmologie, cette branche fascinante de l'astronomie qui a la folle ambition de décrire la structure et l'organisation de l'Univers dans son ensemble.

L'espace cosmique, quand il est conçu dans sa globalité, n'est certainement pas l'espace qui vous est le plus familier. Ce n'est pas celui dans lequel les hommes ont réussi à envoyer des sondes spatiales, ni celui dans lequel notre ami ici présent Jean-François Clervoy a flotté en micropesanteur. C'est un espace beaucoup plus lointain, qui n'est que partiellement accessible aux yeux de nos plus grands télescopes, mais qui est accessible, du moins l'espère-t-on du côté des théoriciens, aux « ailes de l'esprit », c'est-à-dire aux modèles mathématiques qui tentent de décrire la structure globale de l'Univers.

La cosmologie me fascine depuis mon adolescence. Quand, dans ma Provence natale, je contemplais le ciel nocturne, au-delà de la beauté du firmament étoilé, j'étais surtout intrigué par le « noir » qu'il y a entre les étoiles. Ce n'était pas le contenu, mais le contenant qui m'intriguait. Or ce contenant invisible, c'est l'espace. Ce tissu impalpable a-t-il une réalité matérielle, est-il fini ou infini, a-t-il une forme ? Ayant réfléchi depuis trente ans sur ces questions, je vais tenter de vous en parler ce soir en termes simples. L'espace, pour reprendre une citation de Platon, n'a jamais été chanté dignement par les poètes d'ici-bas, mais je prétends qu'il est possible de le chanter dignement en utilisant la langue universelle de la géométrie.

L'Univers est « quelque chose » de plus riche que le simple espace. L'Univers, c'est de l'espace, du temps et de la matière qui interagissent. En premier lieu, il a une *histoire*, et cela représente peut-être la plus grande découverte scientifique du XX^e siècle, en tout cas dans le domaine des sciences de l'Univers. Elle a marqué l'avènement d'une cosmologie réellement scientifique, c'est-à-dire fondée à la fois

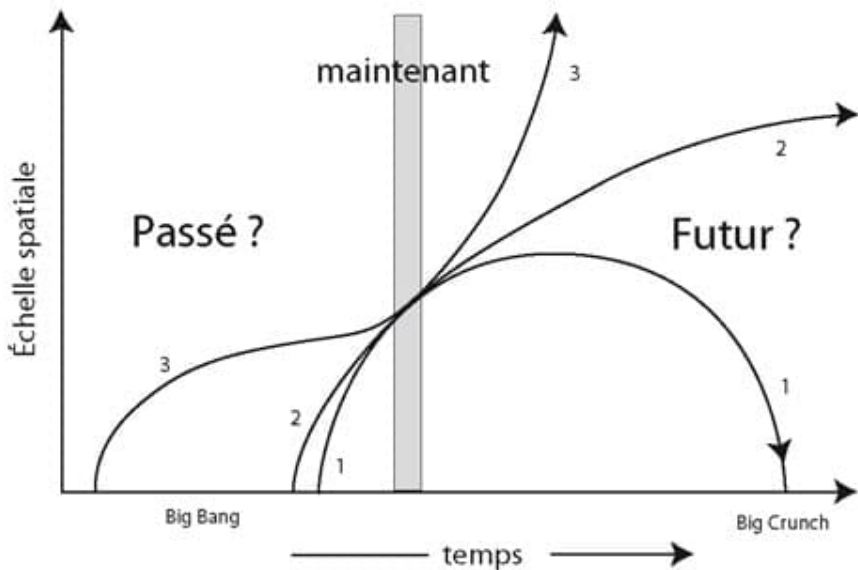
sur une théorie de physique fondamentale – la relativité générale d'Einstein – et sur des observations astronomiques. Le développement de très grands télescopes permet depuis quelques années de détecter des astres extrêmement lointains, situés aux confins de l'univers observable, et donc de plonger dans le passé de l'Univers. Vous savez en effet que nous recevons notre information des astres lointains par la lumière qu'ils émettent, et cette lumière voyage à vitesse finie : 300 000 km/s. Les astres que nous voyons aujourd'hui nous paraissent tels qu'ils étaient au moment où ils ont émis leur lumière. Par exemple, quand nous observons une galaxie située à 5 milliards d'années-lumière, nous la voyons telle qu'elle était il y a 5 milliards d'années. Par conséquent, à mesure que nous explorons les contrées de plus en plus lointaines de l'Univers, nous accomplissons une fantastique plongée dans son passé.

En second lieu, l'Univers a une *forme*. Celle-ci peut d'abord se décrire à une échelle locale (je parle ici en tant qu'astronome, pour lequel le « local » s'étend à des distances de quelques millions d'années-lumière !). À ce niveau, l'espace-temps possède une « courbure », notion que je préciserai plus loin. L'Univers se décrit aussi à une échelle plus vaste : lorsqu'on l'envisage dans sa globalité, sa forme peut être étudiée par une branche de la géométrie appelée *topologie*. La « topologie de l'Univers » sera le thème essentiel de mon intervention.

Revenons pour l'instant à l'histoire de l'Univers. Vous le savez sans doute, elle se décrit bien dans le cadre des modèles de Big Bang, qui ont alimenté beaucoup de controverses. Ces modèles de Big Bang ont pourtant une solide assise théorique et expérimentale, qui les rend pour l'instant « incontournables ». À partir d'un état originel qui suscite nombre d'interrogations physiques, voire métaphysiques, ces modèles décrivent une évolution irréversible, essentiellement une expansion de l'espace accompagnée d'une structuration progressive de la matière, qui a conduit l'Univers d'un état primitif et chaotique à l'état que nous pouvons présentement observer, c'est-à-dire un univers structuré en galaxies, étoiles, planètes, masses gazeuses, particules et rayonnements.

Dans un champ de galaxies, chaque objet lumineux est un vaste regroupement d'étoiles analogue à la Voie lactée, qui est notre propre galaxie (voir [cahier 1](#), [figure 3](#)). Chacune de ces galaxies lointaines rassemble plusieurs milliards d'étoiles. Ce sont des observations effectuées dans la décennie 1920-1930 et portant sur le mouvement radial des galaxies qui ont conduit à la découverte de l'expansion de l'Univers. Les astronomes de l'époque, pointant leurs télescopes, ou plus précisément leurs spectroscopes, afin d'analyser les vitesses apparentes des galaxies à travers le décalage de leurs raies spectrales,

se sont aperçus que les galaxies lointaines semblaient systématiquement s'éloigner de nous. Comment interpréter cela ? Fallait-il revenir à une conception antique où nous, observateurs, occuperions une position spéciale au centre de l'Univers, les galaxies fuyant de toutes parts autour de nous ? Un tel retour en arrière était impossible. En réalité, l'interprétation correcte de ces observations se trouvait déjà contenue en germe dans la théorie de la relativité générale, élaborée quelques années auparavant par Albert Einstein pour décrire les phénomènes de la gravitation. Si nous voulons comprendre la structure et l'organisation de l'Univers à grande échelle, il est clair qu'il faut une théorie fondamentale de la gravitation, car c'est la gravitation qui sculpte la forme de l'Univers à grande échelle, ainsi que son évolution au cours du temps : son passé, son présent et son futur. C'est pourquoi l'interprétation correcte du mouvement de fuite des galaxies se trouve dans les équations de la relativité générale. Celles-ci traduisent une variation du « rayon d'échelle de l'Univers » au cours du temps. Si vous prenez deux points arbitrairement éloignés dans l'espace et si vous mesurez leur séparation, vous vous apercevrez qu'à mesure que le temps cosmique s'écoule, cette séparation augmente. Autrement dit, c'est l'espace qui est en expansion en chacun de ses points, et non pas les galaxies qui s'éloignent de nous ! Si nous nous transportions sur une galaxie située à des milliards d'années-lumière d'ici pour faire les mêmes observations astronomiques, nous constaterions la même chose, à savoir que les galaxies sembleraient s'éloigner de nous. Ce ne sont pas les galaxies qui bougent, c'est le tissu de l'espace lui-même qui se dilate, emportant avec lui les galaxies. Ce n'est pas le « contenu » qui bouge, mais le « contenant » : l'espace a une véritable dynamique. C'est cela, l'expansion de l'Univers. Constatée expérimentalement, elle est parfaitement prévue par les solutions cosmologiques des équations de la relativité générale, appelées modèles de Friedmann-Lemaître, ou plus communément « modèles de Big Bang ».



Les modèles de Big Bang

À partir de là, quelques grandes questions se posent :

- Cette expansion va-t-elle se poursuivre à jamais, auquel cas nous serions dans un univers au futur perpétuel, se déployant dans un temps infini ? Un tel univers se refroidirait perpétuellement en se dilatant, les galaxies se séparant toujours plus les unes des autres, les étoiles finissant toutes par s'éteindre ; dans ce destin infiniment lointain, l'Univers deviendrait complètement froid et obscur.

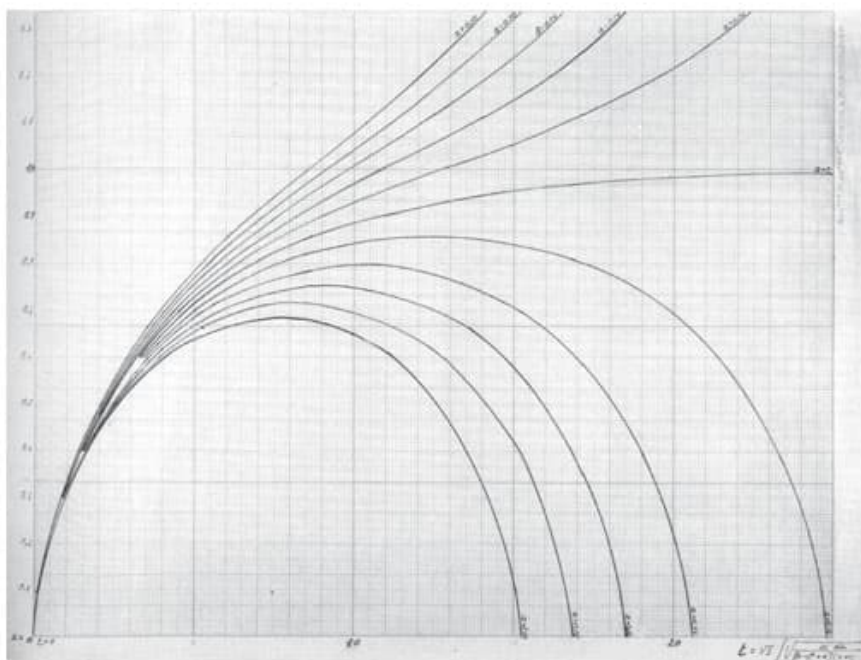
- Ou au contraire, l'Univers atteindra-t-il un stade d'expansion maximale pour laisser place à une phase de contraction générale, s'achevant dans un événement tout aussi singulier que celui du début : une sorte de symétrique du Big Bang initial que les astrophysiciens ont appelé « Big Crunch » (écrasement final) ?

Telle est l'interrogation qui porte sur le futur de l'Univers, sur une échelle de temps dépassant largement celle de nos activités humaines, mais qui n'en est pas moins prégnante.

Une autre grande interrogation concerne le passé de l'Univers : comment les événements cosmiques se sont-ils réellement déroulés depuis le Big Bang ? Dans tous les cas de figure, les modèles relativistes présentent un tel début singulier de l'Univers. Nous traduisons parfois improprement le terme de Big Bang par « grande explosion » ou « grand boum », mais en réalité le début de l'Univers n'a nullement été cela. Quand nous pensons à une grande explosion, nous nous représentons un morceau de matière qui explose dans un espace préexistant, et qui projette des débris se propageant dans toutes les directions. Nous visualisons un centre d'explosion, un lieu

d'explosion, une date d'explosion. Or, dans le cas du Big Bang, il n'y a ni temps, ni espace, ni lieu. Le Big Bang n'a pas eu lieu quelque part dans un espace préexistant, car le Big Bang aurait lui-même « créé » l'espace, le temps et la matière.

Avons-nous des réponses aux grandes questions citées plus haut, qui mobilisent les cosmologistes depuis l'invention des modèles de Big Bang il y a soixante-dix ans ? Partiellement, oui. En ce qui concerne le sort futur de l'Univers, des observations astronomiques très récentes et d'une précision sans précédent suggèrent enfin une réponse ferme : l'Univers serait en expansion perpétuelle, qui serait, de plus, accélérée. Je vous montre ici un document historique, une série de courbes manuscrites tracées en 1927 par Georges Lemaître, le génial inventeur des modèles physiques de Big Bang. Il avait déjà envisagé tous les cas de figure possibles pour l'évolution de l'Univers à partir d'une singularité initiale, en fonction de certains paramètres cosmologiques tels que la courbure, la quantité moyenne de matière cosmique et la densité d'énergie du vide. Selon les valeurs de ces paramètres, les solutions relativistes prédisaient soit un univers en expansion-contraction, soit un univers en expansion perpétuelle mais ralentie, soit enfin un univers en expansion accélérée. Lemaître avait déjà marqué sa préférence pour un modèle à expansion accélérée. On ne l'a pas écouté de son vivant, mais l'actualité lui donne magnifiquement raison !

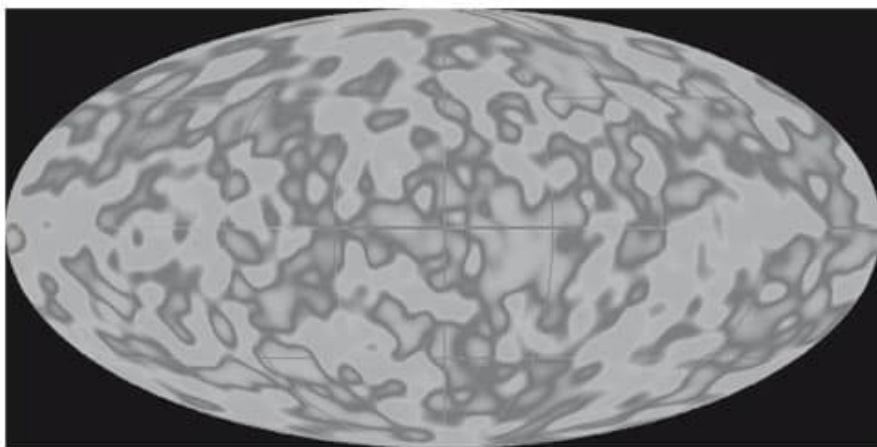


Les modèles cosmologiques de Lemaître

Examinons maintenant l'un des plus magnifiques clichés pris par le télescope spatial Hubble (voir [cahier 1, figure 4](#)). Nous y voyons un champ du « ciel profond », en ce sens que le temps de pose très long permet de voir des galaxies extrêmement peu lumineuses, donc statistiquement très lointaines. Il est stupéfiant de réaliser que ce champ correspond à celui que le chas d'une aiguille tendue à bout de bras découperait sur le ciel : il est si petit que c'est comme si l'on regardait « entre les arbres de la forêt », c'est-à-dire entre les étoiles de notre propre galaxie. On n'y voit en effet que des galaxies extérieures. Certaines sont proches – les plus grosses et les plus lumineuses, tandis que les galaxies les plus faibles sont certainement plus lointaines. Le plus remarquable est que malgré l'étroitesse du champ de vue, on découvre un univers incroyablement peuplé de galaxies de toutes les formes et de toutes les couleurs. Ce formidable télescope, qui nous autorise à remonter dans le passé de l'Univers, nous permet de constater que l'Univers a connu une forte évolution. Les galaxies les plus lointaines n'ont pas les mêmes formes ni les mêmes couleurs que les galaxies les plus proches. Cela signifie bien que, dans le passé de l'Univers, les galaxies et les étoiles n'étaient pas de même composition que celles qui nous sont contemporaines – un phénomène évolutif prédit par les modèles de Big Bang.

Jusqu'où peut-on remonter dans le passé de l'Univers ? Eh bien, à l'aide d'instruments de plus en plus sophistiqués, nous sommes parvenus à atteindre une époque où même les étoiles et les galaxies ne s'étaient pas encore formées ! La carte du « rayonnement fossile » prise en 1992 ([voir page suivante](#)) – peut-être le grand cliché astronomique du XX^e siècle, car il s'agit tout simplement de la première lumière jamais émise par l'univers primitif, peu après le Big Bang. À première vue, le cliché n'est pas très impressionnant. Il ne présente que deux couleurs réparties dans des taches. En réalité, le cliché est pris dans une gamme particulière de longueurs d'onde située hors du domaine visible : les micro-ondes. C'est une sorte de mappemonde céleste représentant la frontière de l'univers observable, analogue aux mappemondes représentant la surface de la Terre. Nous ne voyons ni étoile ni galaxie ; nous voyons seulement la première lumière émise par l'Univers, au moment où celui-ci a cessé d'être opaque. Les modèles de Big Bang prédisent que durant les 300 000 premières années de son expansion, l'Univers était si dense et si concentré que la lumière ne pouvait pas se propager – elle était en quelque sorte « piégée » dans le plasma primordial, constitué de particules élémentaires électrisées. En se dilatant, l'Univers a fini par devenir transparent. Cette lumière (presque) originelle correspond, par rapport au temps présent, à un recul d'environ 15 milliards d'années dans le passé. C'est forcément l'image la plus ancienne que nous puissions

capter de l'Univers, du moins dans le domaine électromagnétique. Aucun télescope du futur, aussi puissant soit-il, ne pourra jamais percer ce mur d'opacité correspondant à l'Univers jeune de 300 000 ans.



Carte du rayonnement fossile et des fluctuations de température

Le rayonnement micro-ondes du fond de ciel est le fossile refroidi de l'univers primitif. Il se caractérise par une température, qui varie de point en point autour d'une valeur moyenne. Les variations de température sont codées par des couleurs ; c'est la raison pour laquelle on n'utilise essentiellement que deux couleurs : les zones rouges représentent un excès de température par rapport aux zones bleues, qui sont plus froides. Il est fascinant de découvrir exactement ce que prédisaient les modèles de Big Bang. En premier lieu, un univers primitif extrêmement homogène. Imaginez une soupe, plus précisément un mélange de particules élémentaires et de rayonnement en équilibre thermique ; sa température est de 3 000 degrés. Son image, refroidie par 15 milliards d'années de voyage dans un espace en expansion, nous parvient refroidie à la température exacte de 2,728 K (je rappelle qu'il existe une échelle absolue de températures, dite Kelvin, dans laquelle le zéro correspond à -273 degrés Celsius, de sorte que les 2,7 K de température du rayonnement fossile valent -270 °C). En second lieu, le rayonnement fossile présente des petites irrégularités. Les grumeaux les plus denses sont les grumeaux les plus chauds, mais la différence entre les grumeaux les plus chauds et les grumeaux les plus froids n'est que d'un cent millième de degré ! Ces infimes irrégularités sont pourtant la source de toutes les structures astronomiques qui existent aujourd'hui dans l'Univers. Nous sommes tous les « descendants » de ces grumeaux primordiaux. Imaginez l'écran de projection qui avance vers vous, et le film de l'évolution

cosmique qui se déroule au cours des milliards d'années. À mesure que l'écran s'approche, vous voyez les grumeaux se rassembler et se condenser, pour former au bout d'environ 1 milliard d'années les premières galaxies et les premiers amas de galaxies. Puis les premières étoiles naissent, et plusieurs générations d'étoiles se succèdent. Plus près de nous – il y a 5 milliards d'années dans notre échelle du passé –, notre propre système solaire se condense, avec son cortège planétaire. Puis la vie apparaît sur Terre, et enfin, aujourd'hui, nous voici rassemblés dans cette salle pour parler de toute cette merveilleuse histoire ! La carte du rayonnement fossile est bien la meilleure preuve expérimentale prouvant la très forte évolution que l'Univers a connue depuis le Big Bang...

Les physiciens brûlent de savoir ce qui s'est passé *avant* ce fameux mur des 300 000 années, de voir « derrière l'écran ». Ils rêvent de s'approcher au plus près possible de l'inaccessible Big Bang (inaccessible car il correspondrait à une température infinie). Alors, ils utilisent les yeux de la théorie pour observer l'inobservable ; plus précisément, ils étudient des phénomènes de l'univers très primitif qui, bien qu'indétectables directement, auraient laissé des empreintes visibles dans les époques ultérieures. Or un certain nombre de phénomènes physiques nous permettent effectivement de remonter très haut dans l'histoire du Big Bang. Par exemple, il suffit de mesurer dans l'Univers actuel les proportions relatives des éléments légers, c'est-à-dire essentiellement l'hydrogène, le deutérium, l'hélium et le lithium, pour avoir une idée des conditions dans lesquelles ces éléments se sont formés au bout de seulement trois minutes d'expansion – lorsque la température moyenne de l'Univers était de 10 milliards de degrés. Les calculs du Big Bang sont parfaitement confirmés. Mieux encore, puisque l'Univers primitif a été très chaud et très dense, on peut le simuler en laboratoire dans des expériences de physique des hautes énergies. C'est ce que l'on réalise dans de puissants accélérateurs de particules comme celui du CERN. On y atteint des niveaux d'énergie permettant de reconstituer le passé de l'Univers jusqu'à... un dix milliardième de seconde après le Big Bang !

Malgré cet exploit, nous voudrions comprendre de plus près l'événement originel lui-même : la naissance de l'espace et du temps, sur laquelle butent nos théories actuelles, la relativité générale et la physique quantique. C'est le grand enjeu de la physique du XXI^e siècle que de trouver une solution à ce problème. Trouver une théorie unifiée qui englobe les phénomènes gravitationnels, relevant de la relativité générale, et les phénomènes qui mettent en jeu les interactions entre particules élémentaires, relevant de la mécanique quantique.

Plusieurs pistes sont explorées, certaines plus prometteuses que

d'autres. Bien que très spéculatif, l'un des scénarios les plus intéressants sur la « cosmogénèse quantique », ouvre de fascinantes perspectives : notre univers pourrait être né spontanément d'une « fluctuation du vide quantique ». Précisons cela ! Le vide, c'est normalement l'absence de toute chose. Prenez une boîte et enlevez tout ce qu'elle contient : les particules, les champs, les rayonnements, etc. Que reste-t-il ? Selon la physique classique, il ne reste rien. La physique quantique nous enseigne toutefois qu'il reste une énergie *non nulle* à son niveau minimal, représentant donc l'état fondamental le plus stable. De plus, le vide quantique doit fluctuer aléatoirement. Ces phénomènes ont été mis en évidence dans des expériences de laboratoire. Nous pourrions nous figurer le vide quantique comme la surface d'un océan bouillonnant d'énergie qui engendre aléatoirement, sur des périodes de temps très courtes, d'énormes fluctuations d'énergie semblables à des vagues qui détachent des gouttelettes d'écume. En appliquant ces notions à la description quantique du Big Bang, on en déduit que toute la réalité matérielle du monde (espace, temps, énergie, matière) ne serait que l'écume du vide quantique.

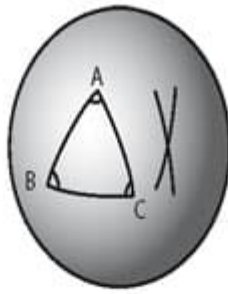
Pour donner un peu plus de consistance à mon propos, voir une simulation numérique calculant quatre instantanés de la « création du monde » qui se seraient déroulés en un laps de temps de 10^{-35} seconde, et qui montrent combien l'état initial du vide est fortement instable (voir [cahier 1, figure 5](#)). Vous constatez que le vide quantique développe immédiatement d'énormes fluctuations d'énergie, représentées sous forme de pics, et chacun de ces pics représente la probabilité de naissance d'un univers à part entière. Ainsi, dans ce scénario, notre univers, qui à nos yeux paraît immense, ne serait qu'une minuscule bulle parmi une infinité d'autres univers-bulles, tous nés spontanément du vide quantique, mais à des époques fort différentes. Chaque bulle d'univers aurait ses propres lois physiques, sa propre évolution. Certaines bulles seraient en expansion-contraction, d'autres ne vivraient qu'une fraction de seconde, d'autres seraient éternelles. La plupart des bulles ne formeraient jamais d'étoiles, jamais de galaxies, jamais d'êtres vivants, jamais d'Académie de l'air et de l'espace. Mais notre bulle, elle, a formé tout cela, au hasard de sa naissance survenue il y a 15 milliards d'années, dans cet événement que nous appelons naïvement Big Bang...

Voilà pour la reconstitution du passé de l'Univers. Maintenant il est temps d'aborder le sujet central de l'« univers chiffonné ». La question de la forme de l'espace m'a depuis toujours fasciné. Je me souviens qu'adolescent, lisant un manuel d'astronomie dont la dernière page parlait de la relativité générale, je découvris une phrase qui me stupéfia : selon la conception d'Einstein, l'espace-temps aurait la forme d'un mollusque... Depuis lors, je n'ai eu de cesse de mettre de

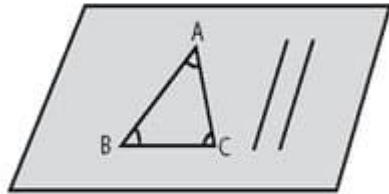
la « rationalité » dans cette formulation à consonance étrange, sinon poétique. En réalité, j'ai appris bien plus tard que le « mollusque d'espace-temps » n'était qu'une façon mathématique de décrire la géométrie « élastique » de l'espace-temps en relativité générale. La théorie d'Einstein dit en effet que notre univers est une sorte d'interaction subtile entre la matière et le tissu malléable de l'espace-temps. Tout corps massif engendre une courbure de l'Univers. Cela peut paraître très étrange, mais le célèbre astronome et mathématicien Gauss avait déjà tenté de mesurer la courbure de l'espace dans les années 1830. En visant à l'aide d'une petite lunette des pics montagneux situés dans le sud de l'Allemagne, Gauss avait mesuré la somme des angles du triangle géodésique ainsi formé, pour vérifier si l'espace était euclidien, c'est-à-dire si la somme de ses angles était bien égale à 180 degrés. Gauss fut ainsi le précurseur d'une révolution fondamentale dans l'histoire des sciences : la possibilité que des géométries non euclidiennes puissent exister. Une géométrie non euclidienne est une géométrie dans laquelle la somme des angles d'un triangle est différente de 180 degrés, ou dans laquelle les parallèles se recoupent, etc., donc une géométrie radicalement différente de celle que nous apprenons habituellement.

Cette image vous montre des exemples extrêmement simples de géométries non euclidiennes dans le cas de surfaces, c'est-à-dire d'espaces à deux dimensions (évidemment, quand on passe à l'Univers réel, il faut considérer 3, 4 ou même davantage de dimensions, et la situation est beaucoup plus compliquée). Une géométrie dans laquelle la somme des angles d'un triangle est supérieure à 180 degrés, par exemple la surface d'une sphère, est un espace dit elliptique, à courbure positive. L'intérieur d'une selle de cheval, par contre, est un espace hyperbolique à courbure négative, où la somme des angles d'un triangle est inférieure à 180 degrés.

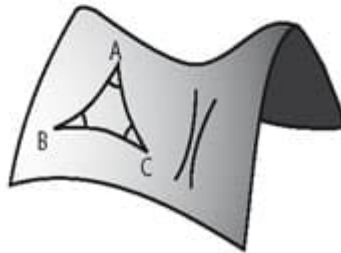
Lorsque les géométries non euclidiennes ont été découvertes, elles ont paru relever de la pure spéculation mathématique, et peu de scientifiques se doutaient qu'elles pourraient plus tard servir à expliquer des phénomènes physiques relevant du monde réel. Or c'est précisément ce qui s'est passé avec la relativité générale, formulée au siècle suivant. Einstein s'est rendu compte que pour formaliser correctement les phénomènes de gravitation, il fallait supposer une nature non euclidienne à l'espace-temps ; selon lui en effet, puisque tout corps massif devait courber l'espace-temps, la gravitation devenait la manifestation du caractère non euclidien de l'espace.



$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} > 180^\circ$$



$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 180^\circ$$

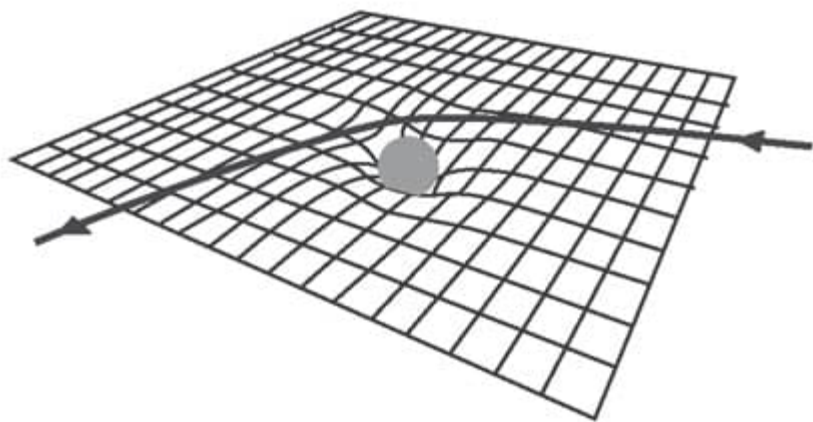


$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} < 180^\circ$$

Trois types de surfaces courbes

L'une des conséquences les plus étonnantes de la relativité générale est l'existence des trous noirs – un sujet qui m'a bien occupé pendant quinze ans de recherches ! Imaginez l'espace-temps (réduit à deux dimensions pour visualiser simplement les choses) sous la forme d'un tissu élastique tissé par les rayons lumineux. Si vous posez des billes dessus, leurs masses impriment des creux dans le tissu – creux d'autant plus prononcés que les masses sont plus concentrées. En poussant le raisonnement jusqu'au bout, on en déduit la possibilité qu'une masse très concentrée puisse creuser un puits si profond que

tout ce qui passe à proximité tombe dedans. Le bord du puits délimite une zone de non-retour dans l'espace-temps, telle que toute trajectoire de particule ou de rayon lumineux qui franchit cette zone reste piégée. C'est un peu cela, un trou noir. Toutefois, de telles distorsions de l'espace et du temps requièrent des conditions quelque peu extrêmes. Si, par exemple, il fallait transformer la Terre en trou noir, il faudrait la compacter dans une petite bille d'un centimètre. Cela donne une idée de l'état de concentration extrême de la matière qui doit régner dans un trou noir. Pour autant, ni la Terre, ni même le Soleil, ne se transformeront jamais en trous noirs, car ils ne sont pas assez massifs. En revanche, de très grosses étoiles qui s'effondrent à la fin de leur vie doivent former des trous noirs d'une dizaine de masses solaires. On pense même qu'au centre de beaucoup de galaxies (dont la nôtre, la Voie lactée), des trous géants et supermassifs (plusieurs millions de masses solaires) existent, et grossissent en capturant des étoiles entières et les brisant en « crêpes » avant de les avaler.



Le tissu élastique de l'espace-temps

Les trous noirs ont beaucoup fasciné les chercheurs, mais aussi les écrivains de science-fiction. Des théories se sont en effet développées selon lesquelles les trous noirs n'auraient pas de fond ; lorsqu'une particule tomberait dans un trou noir, elle transiterait par des sortes de tunnels de l'espace-temps, appelés « trous de ver », pour resurgir ailleurs dans des anti-trous noirs appelés « fontaines blanches ». Ces trous de ver pourraient même déboucher dans d'« autres » univers. Ainsi, les idées quelque peu fantaisistes de la science-fiction sur les univers parallèles acquièrent une certaine réalité mathématique avec les trous noirs. On est presque certain que les trous noirs existent vraiment (de nombreux « candidats » ont été repérés dans les télescopes) ; en revanche, nous n'avons aucune indication sur

l'existence des trous de ver et autres « raccourcis » d'espace-temps. Malgré tout, ces théories laissent entrevoir une structure extrêmement subtile de l'espace-temps, qui pourrait être percé d'une myriade de micro-trous reliés entre eux par des poignées.

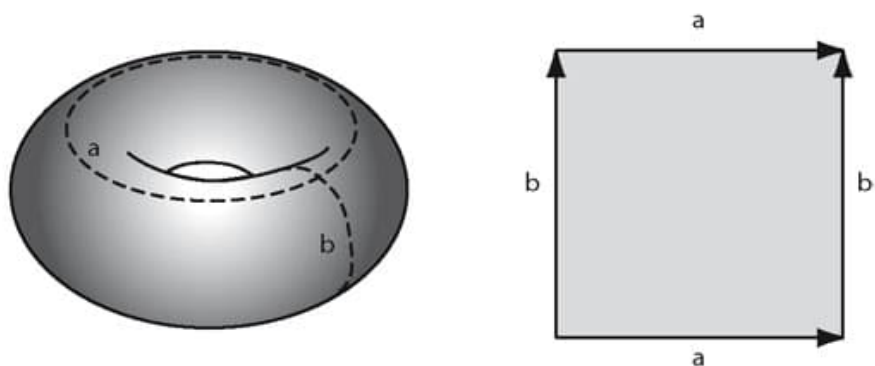
Tout cela peut vous paraître très abstrait, sinon spéculatif. La courbure de l'espace est-elle une pure modélisation, ou bien avons-nous des observations directes qui la mettent en évidence ? Grâce au formidable développement des télescopes, nous voyons aujourd'hui directement la courbure de l'espace à travers les étonnants « mirages gravitationnels ». Dans ce cas, la courbure de l'espace au voisinage d'un corps massif situé sur la ligne de visée d'un objet plus lointain, démultiplie les trajets des rayons lumineux provenant de l'arrière-plan. Nous percevons donc des images fantômes regroupées dans la direction du corps intermédiaire appelé « lentille ». Ce type de mirage est dû à la courbure de l'espace autour de la lentille. Nous avons aujourd'hui repéré des dizaines de tels mirages gravitationnels. Leur analyse très précise nous donne d'ailleurs des informations extrêmement précieuses sur la nature de l'espace-temps, sur la quantité de matière sombre qu'il y a dans l'Univers, etc.



Mirage gravitationnel

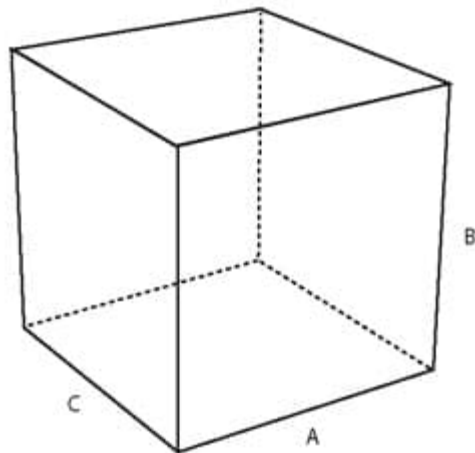
Il est temps maintenant de parler de la forme globale du « mollusque » d'espace-temps, autrement dit de la topologie de l'Univers. C'est un aspect qui a longtemps été négligé en cosmologie, et que je m'efforce de développer dans mes recherches les plus récentes. Vous connaissez tous cette surface étrange que l'on appelle le ruban de Möbius. Vous pouvez la fabriquer avec une bande de papier dont vous collez les bords après avoir effectué un demi-tour. Nous nous apercevons que c'est une surface unilatère, c'est-à-dire une surface qui n'a qu'un côté, ce qui peut paraître paradoxal. Prenez

l'exemple d'une table, vous peignez une face en noir, l'autre en blanc, et vous pouvez donc distinguer deux faces ! Avec le ruban de Möbius, si vous commencez à le peindre en noir, vous verrez qu'à la fin, il ne reste pas d'autre face pour être peinte en blanc. La propriété pour une surface de n'avoir qu'un seul côté relève de la topologie. Une autre fantaisie topologique bien connue depuis le XIX^e siècle consiste à prendre un carré de papier, c'est-à-dire un morceau d'espace euclidien, et de coller ses bords opposés (l'expérience ne peut pas être réalisée avec du papier ordinaire, mais vous pouvez toujours la faire en pensée). Vous obtenez un tore plat, c'est-à-dire une surface qui a la forme d'une chambre à air mais qui n'a aucune courbure. Une bactérie vivant à la surface d'un tore plat et effectuant des mesures géométriques ne ferait pas la différence avec le plan euclidien. Mais si la bactérie décide de filer toujours en ligne droite, elle ne pourra jamais s'éloigner très loin de son point de départ ; en réalité, elle accomplira différents tours du tore et repassera éventuellement par son point de départ. Elle en déduira qu'elle vit dans un espace plat, qui pourtant n'est pas infini : le tore est au contraire fini, totalement fermé sur lui-même.



Construction d'un tore plat

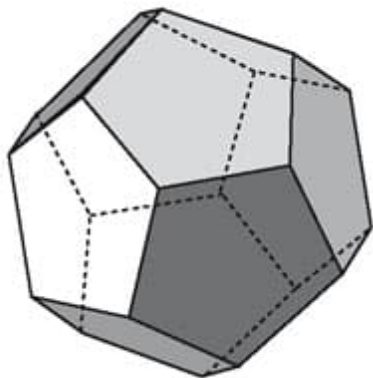
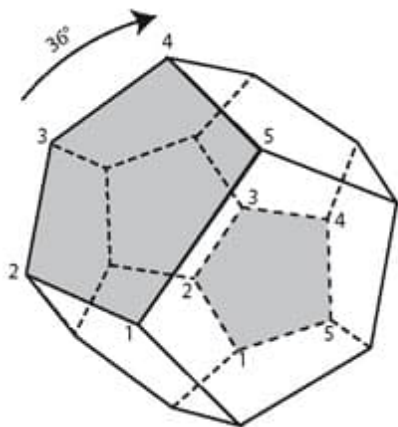
À trois dimensions, il est possible de se livrer à ce même genre d'opérations. Un exemple simple est l'hypertore, espace obtenu en prenant un bloc cubique d'espace euclidien et en collant les paires de faces opposées. Un tel espace reste euclidien (sa courbure reste nulle en chaque point), mais son volume est fini, aucune trajectoire ne pouvant s'éloigner indéfiniment de son point de départ. En fait, les topologistes ont démontré qu'il existe dix-huit topologies différentes pour l'espace euclidien à trois dimensions, dix d'entre elles étant parfaitement finies ! Pour les espaces hyperboliques et sphériques, leurs topologies sont en nombre infini, et aucune d'entre elles n'est *a priori* exclue pour la description de l'espace physique.



Du tore à l'hypertore

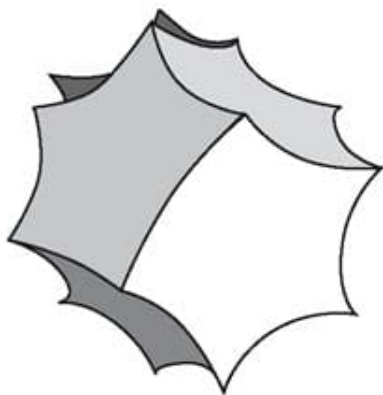
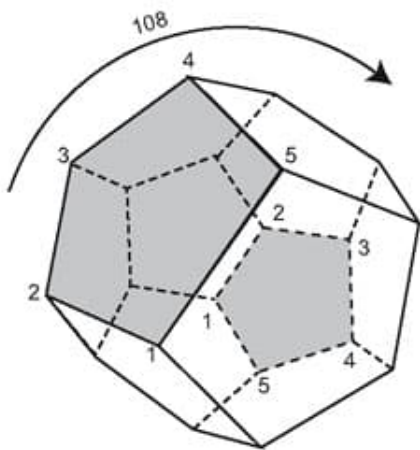
Si les longueurs des arêtes du parallélépipède fondamental sont A, B, C, le volume de l'hypertore obtenu en identifiant les faces opposées est fini, égal à $A \times B \times C$.

Il est donc possible de construire des solutions cosmologiques qui peuvent être finies quelle que soit leur courbure, et qui sont décrites par des formes d'une grande subtilité. Considérons un polyèdre – c'est-à-dire une figure construite par l'assemblage de faces polygonales, dont les côtés communs forment les arêtes du polyèdre et dont les points communs forment les sommets. La plupart des espaces tridimensionnels sont représentables sous forme de polyèdres convexes dont on a identifié convenablement les faces deux à deux, ainsi que tous les sommets. On peut par exemple construire un espace hyperbolique fermé en partant d'un dodécaèdre et en identifiant deux à deux les faces à l'aide de transformations hyperboliques. L'espace intérieur au polyèdre est à courbure négative en chacun de ses points ; pourtant, tout comme l'hypertore euclidien, son volume est fini, et aucune « droite » ne s'éloigne indéfiniment.



L'espace elliptique de Poincaré

Si chaque face d'un dodécaèdre est collée à sa face opposée après avoir subi une rotation de 36 degrés (un dixième de tour), l'espace résultant est l'espace elliptique de Poincaré, variante multiconnexe de l'hypersphère, mais dont le volume est cent vingt fois plus petit.

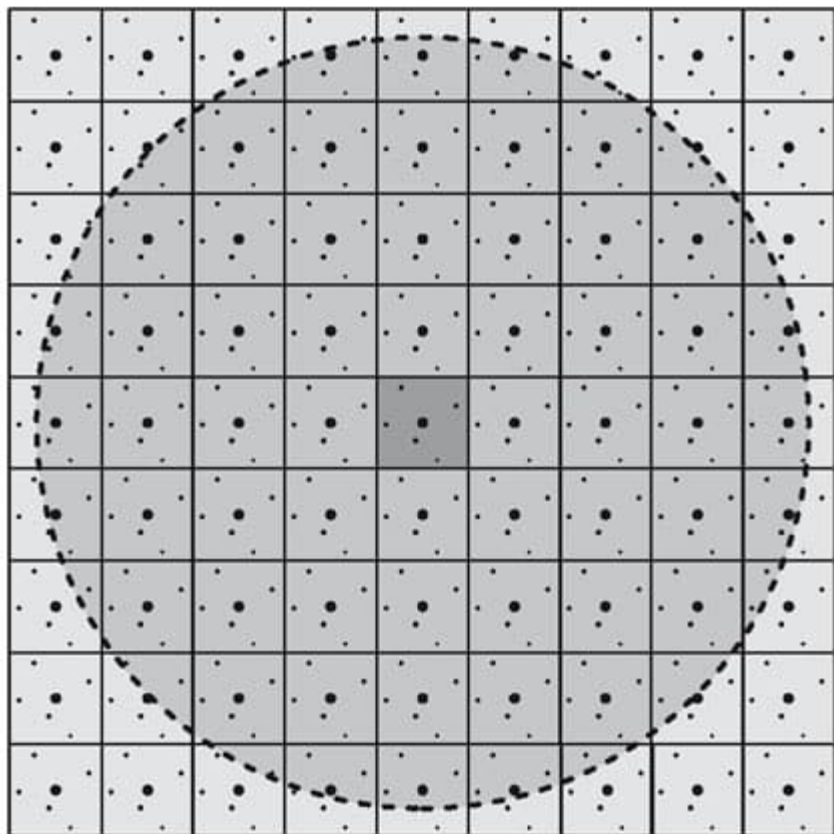


L'espace hyperbolique de Seifert-Weber

Si chaque face d'un dodécaèdre (à gauche) est collée à sa face opposée après avoir subi une rotation de 108° (trois dixièmes de tour), l'espace résultant est l'espace hyperbolique de Seifert-Weber, variante multiconnexe de l'hyperboloïde H^3 , mais dont le volume est fini. Le collage ne peut être réalisé que si l'on utilise un dodécaèdre courbé négativement, avec des angles amincis à 72 degrés (à droite).

Comme vous voyez, la topologie nous réserve bien des surprises. Que peut-on dire de la topologie de l'espace réel ? Avec la cosmologie relativiste, nous ne disposons pas d'une description complète de la forme de l'espace à grande échelle. Quelle est la forme globale de l'espace ? Est-il fini ou infini, orienté ou non, a-t-il des trous, des « poignées » ? La gravitation ne décide pas seule de la forme de l'espace. La topologie cosmique tente de pallier cette incomplétude.

Dans un espace à topologie compliquée, dite « multiconnexe », une infinité de « droites » (appelées plus précisément géodésiques) joignent deux points. Cette propriété confère aux espaces multiconnexes un intérêt exceptionnel en cosmologie. En effet, les rayons lumineux suivent les géodésiques de l'espace-temps. Lorsqu'on observe une galaxie lointaine, nous avons coutume de croire que nous la voyons en un unique exemplaire, dans une direction donnée et à une distance donnée. Or, si l'espace cosmique est multiconnexe, la démultiplication des trajets des rayons lumineux donne des images multiples de la galaxie observée. Comme toute notre perception de l'espace provient de l'analyse des trajectoires des rayons lumineux, si nous vivions dans un espace multiconnexe nous serions plongés dans une vaste illusion d'optique nous faisant paraître l'Univers plus vaste que ce qu'il est. Des galaxies lointaines que nous croirions « originales » seraient en réalité des images multiples d'une seule galaxie.



Modèle bidimensionnel d'espace chiffonné.

Un *espace chiffonné* est un espace multiconnexe de volume fini, et

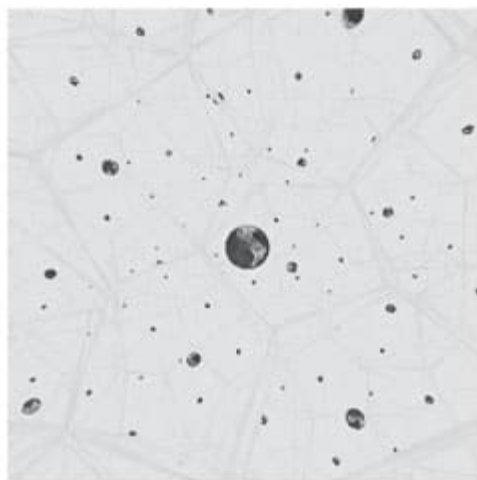
de taille plus petite que l'univers observé (dont le rayon apparent est d'environ 15 milliards d'années-lumière). Si nous vivions à l'intérieur d'un tel espace, l'univers apparent serait très différent de l'Univers physique : nous percevrions un immense cristal cosmique se déployant dans toutes les directions à partir d'une cellule polyédrique de base ; or seule la cellule de base serait « réelle », c'est-à-dire correspondrait à l'espace physique. En conséquence, les observations de galaxies lointaines nous plongeraient dans une vaste illusion d'optique – un mirage topologique : chaque galaxie originale, appartenant au polyèdre de base, se dupliquerait un grand nombre de fois dans le cristal cosmique, engendrant autant d'images fantômes de la galaxie originale, mais vues dans des directions différentes et à des époques variées de son histoire.

Imaginons une pièce tapissée de miroirs sur ses six parois (plancher et plafond compris). Si nous pénétrons dans cette pièce, le jeu des multiples réflexions fait que nous avons immédiatement l'impression de voir l'infini dans toutes les directions, comme si nous étions suspendus au sommet d'un puits sans fond, prêts à être avalés, au moindre mouvement, dans une direction ou une autre. L'espace cosmique, d'apparence gigantesque, pourrait nous bercer d'une illusion semblable. Bien entendu, il ne possède ni murs ni miroirs, et les images fantômes y seraient créées non par la réflexion de la lumière sur les parois de l'Univers, mais par la démultiplication des trajets lumineux empruntant les « plis » d'un espace multiconnexe. Dans un tel modèle, l'espace physique serait plus petit que l'espace observé. Il jouerait le rôle d'une cellule fondamentale dans laquelle se trouveraient les objets originaux, les vraies galaxies et, au-delà, les sources que l'on croirait être de plus en plus lointaines ne seraient que des répliques fantômes des sources proches.

Les espaces chiffonnés créent donc un *mirage topologique* qui généralise les mirages gravitationnels dont j'ai parlé plus haut. Dans le cas du mirage topologique, ce n'est pas un corps particulier qui déforme l'espace, c'est l'espace lui-même qui joue le rôle de lentille déformante. En conséquence, les images fantômes sont réparties dans toutes les directions de l'espace et toutes les tranches du passé. Ce mirage *global* nous permettrait de voir les objets non seulement sous toutes leurs orientations possibles, mais également à toutes les phases de leur évolution.

Si l'espace est chiffonné, il l'est de façon subtile et à très grande échelle, sinon nous aurions déjà identifié des images fantômes de notre propre galaxie ou d'autres structures bien connues. Or ce n'est pas le cas. Comment détecter la topologie de l'Univers ? Nous avons développé des méthodes expérimentales pour tester l'hypothèse de l'univers chiffonné.

Deux familles de tests observationnels ont été proposées, toutes deux fondées sur l'effet de mirage topologique. La première s'applique aux sources lumineuses « localisées » comme les galaxies, les quasars et les amas de galaxies, réparties en profondeur dans l'espace et dans le temps ; la seconde utilise le rayonnement fossile, cette source diffuse dans tout l'espace émise par le plasma chaud de l'univers primitif à une époque unique du passé, et qui nous paraît donc située à la même distance. Chacune de ces deux familles de tests peut elle-même se subdiviser en deux types : une première méthode tente de reconnaître individuellement des images multiples d'un même objet (mêmes galaxies, mêmes amas, etc., pour les sources localisées, mêmes régions du plasma émetteur pour le rayonnement diffus) ; l'autre, plus puissante, renonce à la reconnaissance individuelle et s'attache exclusivement à mettre en évidence des corrélations statistiques entre les positions des sources de rayonnement. Pour ce qui est des sources localisées, la *cristallographie cosmique* tente de repérer certaines répétitions dans la distribution tridimensionnelle des objets lointains ; des histogrammes de séparations de paires sont susceptibles de mettre en évidence un signal topologique sous forme de pics se superposant au bruit de fond qui serait produit par une répartition aléatoire des sources. Pour ce qui est du rayonnement de fond cosmologique, la méthode des paires de cercles est fondée sur la distribution angulaire des fluctuations de température du rayonnement fossile. Ce vestige refroidi du Big Bang permettrait, si l'espace est chiffonné, de mettre en évidence des corrélations particulières prenant l'aspect de *paires de cercles* le long desquels les variations de température cosmique d'un point à l'autre seraient les mêmes.



Mirage topologique dans un espace hyperbolique

La conclusion provisoire issue de la confrontation de ces méthodes aux données actuellement disponibles est que l'Univers ne peut pas être plus petit qu'environ 3 milliards d'années-lumière. Cela laisse encore beaucoup de place pour les modèles d'univers chiffonnés. Dans un travail récent, nous avons montré que, compte tenu des dernières contraintes observationnelles sur la courbure de l'espace, il reste environ 3 000 topologies sphériques candidates pour décrire la structure globale de l'espace – sans compter les 18 formes euclidiennes, au cas improbable où l'espace serait strictement plat.

Les projets expérimentaux de cristallographie cosmique et de détection de paires de cercles corrélés sont en cours. Pour l'instant, la profondeur et la résolution des observations ne sont pas suffisantes pour tirer des conclusions fermes sur la topologie globale de l'espace. Mais les prochaines années ouvrent des perspectives fascinantes ; elles livreront à la fois des sondages profonds recensant un très grand nombre d'amas lointains de galaxies et de quasars, et des mesures à haute résolution angulaire du rayonnement fossile, grâce aux satellites MAP et Planck Surveyor. Nous saurons peut-être alors attribuer une forme à l'espace et répondre à l'une des plus vieilles questions de la cosmologie, qui taraude non seulement les savants mais aussi les philosophes, les artistes et les penseurs.

¹- Discours de réception donné le 24 novembre 2000 à l'Académie nationale de l'air et de l'espace (Toulouse).

La forme de l'Univers¹

L'espace a-t-il une forme ?

La question de la forme de l'espace me fascine depuis mon adolescence, lorsque j'ai ouvert une encyclopédie d'astronomie à la page qui traitait de la relativité générale d'Einstein. Il y était écrit que, dans la conception relativiste, l'espace-temps a la forme d'un mollusque. Cette image m'avait beaucoup intrigué, et depuis lors, j'ai cherché à percer quelques-uns des mystères attachés à ce « mollusque universel ». Lorsqu'ils contemplant un beau ciel nocturne, la plupart des gens n'ont d'yeux que pour le spectacle des étoiles, c'est-à-dire pour le *contenu* de l'Univers. Or on peut aussi s'émerveiller devant le *contenant* invisible : l'espace n'est-il qu'un réceptacle vide et passif qui accueille les corps, ou bien peut-on lui attribuer une forme, une structure, une architecture ? Est-ce qu'il est fini ou infini ? Est-ce qu'il est plat, courbe, rugueux, lisse, continu, granulaire, cabossé, plissé ?

Il est sans doute difficile à la plupart des gens d'attribuer une forme à quelque chose d'aussi impalpable et d'abstrait que l'espace. Au cours des siècles, de nombreuses conceptions philosophiques ont tenté de « donner chair » à l'espace en le considérant, par exemple, comme une substance éthérée qui, non seulement contient les corps matériels, mais aussi les imprègne et partage avec eux certaines de ses propriétés. Pour le physicien, les questions sur la forme de l'espace ne sont pertinentes qu'en utilisant le langage des mathématiques, plus précisément celui de la géométrie.

La première question qui se pose est donc : *quel est l'espace géométrique qui est susceptible de représenter l'espace physique ?*

Le problème est plus compliqué qu'il ne semble à première vue. Certes, l'espace « immédiat » qui nous environne est correctement décrit par la géométrie euclidienne ordinaire, mais l'espace microscopique (c'est-à-dire vu à très petite échelle) et l'espace cosmologique (c'est-à-dire vu à très grande échelle) en diffèrent profondément. De fait, à la question de la forme de l'espace, la physique actuelle donne des réponses différentes selon quatre « niveaux » qui dépendent de l'échelle à laquelle on examine la structure de l'espace. Les niveaux « intermédiaires » sont assez bien

compris, tandis que les niveaux « extrêmes » font l'objet d'hypothèses théoriques originales.

L'un des niveaux intermédiaires bien compris est celui de l'espace local, sur des distances comprises disons entre un milliardième de milliardième de centimètre et cent millions de kilomètres. Un milliardième de milliardième de centimètre, soit 10^{-18} cm, est la longueur actuellement accessible à l'expérimentation dans les accélérateurs de particules, et 100 millions de kilomètres est à peu près la distance Terre-Soleil, qui peut être considérée comme le premier échelon des distances astronomiques. À ce niveau, la géométrie de l'espace physique se décrit très bien par celle de l'espace euclidien ordinaire. « Très bien » veut dire que cette structure mathématique sert de cadre naturel aux théories physiques qui, comme la mécanique classique, la relativité restreinte et l'électromagnétisme, permettent d'expliquer correctement la quasi-totalité des phénomènes naturels. L'espace y est à trois dimensions et sans courbure.

L'autre niveau assez bien compris est l'échelle astronomique : système solaire, étoiles, galaxies et amas de galaxies. À ce niveau, l'interaction dominante qui sculpte la forme de l'espace physique est la gravité. Celle-ci est décrite par la relativité générale d'Einstein, qui fait apparaître une structure non euclidienne de l'espace-temps. La géométrie différentielle des espaces dits « riemanniens » permet précisément de décrire les espaces courbes. Il existe de nombreuses modélisations possibles. Par exemple, à très grande échelle, la courbure est relativement « douce » et uniforme. Les cosmologistes travaillent donc dans le cadre d'espaces à courbure constante. Au voisinage d'objets très compacts comme les trous noirs, la courbure peut au contraire varier fortement d'un point à l'autre. La géométrie de Schwarzschild est un exemple de modélisation de la forme de l'espace-temps autour d'un trou noir sphérique.

Les niveaux extrêmes sont encore mal compris. Ainsi, la description de l'espace à l'échelle ultramicroscopique, c'est-à-dire sur des distances inférieures au milliardième de milliardième de centimètre, est liée à l'un des plus grands enjeux de la physique actuelle : l'unification des interactions fondamentales. Celle-ci tente de marier deux points de vue extrêmement différents : celui de la mécanique quantique, qui décrit les interactions en termes de champs, et celui de la relativité, qui décrit la gravité en termes de courbure.

Aucune théorie de « gravité quantique » satisfaisante n'a encore vu le jour, mais plusieurs scénarios sont actuellement étudiés. Dans tous les cas, les conceptions géométriques habituelles sur l'espace et le temps sont bouleversées. Par exemple, la théorie des *supercordes*

introduit des dimensions spatiales supplémentaires ; une autre approche appelée *gravité quantique à boucles* décrit un espace-temps granulaire ; d'autres approches encore conçoivent la structure infinitésimale de l'espace-temps comme une sorte d'océan bouillonnant d'énergie, agité de « vagues » (qui seraient en fait les fluctuations quantiques de l'énergie du vide), et produisant de l'« écume » (ce qui ouvre la possibilité d'une multitude d'univers-bulles).

Qu'en est-il à l'autre extrémité de l'échelle, à savoir la forme globale de l'espace sur des distances supérieures au milliard d'années-lumière ? La question pose des problèmes géométriques spécifiques qui ne relèvent plus seulement de la courbure, mais aussi de la topologie. La topologie est la branche de la géométrie qui classe les formes globales des espaces. Or elle n'est incorporée ni dans la relativité générale, ni dans les approches unificatrices de la physique des hautes énergies. Pour reprendre l'image pittoresque du « mollusque universel » dont je parlais tout au début, avec la topologie il ne s'agit plus de savoir si le mollusque universel possède des bosses ou des creux, mais de savoir s'il s'agit d'un escargot, d'une limace ou d'un calmar... Une nouvelle discipline est donc née : la *topologie cosmique*. Elle applique aux modèles cosmologiques relativistes les remarquables découvertes mathématiques qui ont été effectuées récemment dans le domaine de la topologie.

Les modèles de Big Bang

La cosmologie moderne recherche des solutions des équations de la relativité générale qui sont aptes à décrire la structure de l'Univers à grande échelle, tout en étant compatibles avec les observations astronomiques. Les modèles négligent les irrégularités de la distribution de matière comme les étoiles, les galaxies ou les amas de galaxies, de même que le géographe néglige en première approche les irrégularités de la surface terrestre (montagnes, vallées, etc.) : l'Univers est donc supposé avoir partout les mêmes propriétés ; il est dit « homogène et isotrope ».

On peut facilement deviner que, si l'espace est courbé par une distribution uniforme de la matière, sa courbure est elle-même uniforme, c'est-à-dire constante d'un point à l'autre. Bien entendu, cette courbure peut varier au cours du temps.

Les modèles cosmologiques à courbure spatiale constante ont été découverts dans les années 1920 par Alexandre Friedmann et Georges Lemaître. Pour simplifier, je les appellerai modèles de Big Bang. Ils se caractérisent par deux propriétés seulement : leur courbure, qui est constante dans l'espace mais dont il reste à préciser le signe et

l'intensité, et leur dynamique, c'est-à-dire leur évolution au cours du temps.

En ce qui concerne la courbure, il n'y a que trois familles d'espaces possibles, selon le signe de la courbure. L'espace « euclidien » est celui qui a une courbure partout nulle. On connaît bien ses propriétés. Par exemple, pour s'assurer qu'un espace est euclidien, il suffit de vérifier que la somme des angles d'un triangle quelconque fait bien 180 degrés – ou, ce qui revient au même, de vérifier le théorème de Pythagore.

Deuxième cas de figure, l'espace sphérique a une courbure constante positive ; la somme des angles d'un triangle y est toujours supérieure à 180 degrés. Troisième cas de figure, l'espace « hyperbolique » a une courbure négative, la somme des angles d'un triangle y est toujours inférieure à 180 degrés.

Or la relativité générale indique comment évaluer la courbure de l'espace : sa valeur dépend de la densité moyenne d'énergie contenue dans l'Univers. En dessous d'un certain seuil critique de densité égal à environ 10^{-29} g/cm³ (à peu près un atome d'hydrogène par mètre cube d'espace), l'espace est de géométrie hyperbolique ; au-dessus il est de géométrie sphérique. Il n'est euclidien qu'à la frontière exacte. Par commodité, les cosmologistes utilisent le *paramètre de densité*, défini comme le rapport entre la densité réelle de l'Univers (toutes formes de matière et d'énergie confondues) et la densité critique. Si le paramètre de densité est inférieur à 1, la courbure est négative ; s'il est égal à 1, la courbure est nulle, et s'il est supérieur à 1, la courbure est positive. Ce lien entre la courbure et la densité permet d'accéder expérimentalement à la géométrie macroscopique de l'espace.

Encore faut-il s'entendre sur ce que l'on appelle densité de l'Univers. Bien entendu, il y a la densité de matière visible : étoiles, galaxies, rayonnements, etc. Mais il serait vain de croire que nous voyons toute la matière de l'Univers. Différentes raisons montrent qu'en plus de ce que révèlent les observations télescopiques, il existe de grandes quantités de matière dite sombre : des trous noirs, des petites étoiles trop peu massives pour briller, de vastes nuages de gaz formés d'hydrogène froid, des quantités énormes de particules massives produites lors du Big Bang. Nous disposons de certains moyens pour déceler les traces de cette matière sombre, non par son rayonnement électromagnétique, mais par les effets gravitationnels qu'elle engendre sur les mouvements des étoiles et des galaxies visibles. Dans le bilan global de l'énergie cosmique, il faut ajouter à la matière visible et à la matière sombre une forme particulière d'énergie, appelée *énergie noire*. Ce facteur joue le rôle d'une interaction répulsive qui s'opposerait, à grande échelle, à la gravitation attractive. Sans avoir d'effet dans les phénomènes locaux

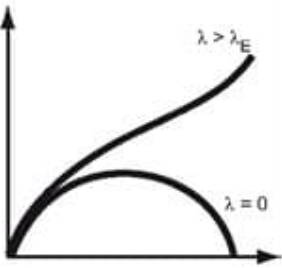
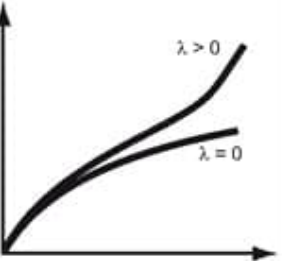
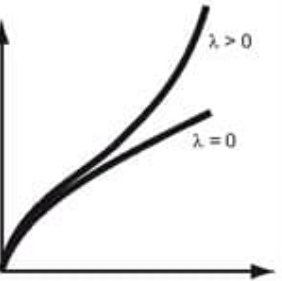
(par exemple le système solaire ou notre galaxie), elle modifie la géométrie et la dynamique de l'Univers dans sa globalité. Pleinement justifiée sur le plan du formalisme mathématique, l'énergie noire jouit d'un statut physique ambigu, et nous ne savons pas actuellement l'interpréter avec certitude. Certains théoriciens la considèrent comme un terme constant appelé « constante cosmologique », d'autres comme une manifestation de l'énergie du « vide quantique », d'autres encore comme une forme d'énergie variable au cours du temps nommée « quintessence », etc.

En ce qui concerne l'évolution temporelle de l'Univers, c'est-à-dire la deuxième propriété caractéristique des modèles de Big Bang, deux scénarios sont possibles à partir des équations : soit l'expansion se ralentit fortement à partir du Big Bang, dilate l'espace jusqu'à un volume maximal, puis laisse place à un mouvement inverse de contraction et de réchauffement, qui s'achève en un ultime embrasement de l'Univers : le « Big Crunch » ; soit l'expansion actuelle se poursuit à jamais, diluant et refroidissant sans cesse l'Univers. Cette seconde possibilité se subdivise elle-même en deux, selon que l'expansion ralentit sans jamais s'arrêter, ou au contraire s'accélère.

Là encore, ces solutions théoriques dépendent de la valeur de la courbure de l'espace, de la densité moyenne de matière et de l'énergie noire. Ce dernier terme, je l'ai dit, est répulsif, il a donc pour effet d'accélérer la vitesse d'expansion. Cela implique que l'espace, quelle que soit sa courbure, peut être en expansion perpétuelle s'il contient suffisamment d'énergie noire.

C'est justement ce qu'indiquent les plus récentes observations astronomiques. Depuis 1998, l'observation de supernovæ (c'est-à-dire des étoiles qui explosent) dans des galaxies lointaines, et l'analyse de certaines caractéristiques du rayonnement fossile, dont je reparlerai plus loin, ont conduit les chercheurs à fixer d'une part le paramètre de densité dans une fourchette de valeurs assez étroite voisine de la valeur critique 1, tout en privilégiant une valeur légèrement supérieure, en conséquence de quoi l'espace serait sphérique (courbé positivement), ou à la limite euclidien (de courbure strictement nulle). D'autre part, que ce paramètre de densité est la somme d'environ un tiers de matière gravitante et de deux tiers d'énergie noire antigravitante. En conséquence de quoi l'Univers serait en expansion perpétuelle accélérée.

Telles sont les dernières nouvelles sur le destin futur de l'Univers !

courbure	topologie	dynamique	destin
$K > 0$  sphérique	fini		ouvert si λ grand fermé
$K = 0$  euclidien	fini ou infini		ouvert
$K < 0$  hyperbolique	fini ou infini		ouvert

Ce tableau résume les divers cas pour les modèles de Big Bang. La première colonne indique le signe de la courbure spatiale, la deuxième le caractère fini ou infini de l'espace, la troisième le comportement temporel du facteur d'échelle, la quatrième le caractère ouvert ou fermé du modèle. On constate que la courbure de l'espace ne dicte ni l'évolution temporelle de l'Univers (sauf si la constante cosmologique est nulle), ni le caractère fini ou infini de l'espace (sauf si la topologie est monoconnexe, voir ci-après).

La topologie cosmique

On pourrait s'estimer satisfaits et s'arrêter là, mais en fait, avec la cosmologie relativiste, nous ne disposons pas d'une description complète de la forme de l'espace. Quelle est sa forme globale ? Est-il fini ou infini, orienté ou non, en un ou plusieurs morceaux, possède-t-

il des trous, des « poignées » ? La gravitation ne décide pas seule de la forme de l'espace. La topologie cosmique tente de pallier cette incomplétude.

En ce qui concerne par exemple le caractère fini ou infini de l'espace, on sait que tout espace de courbure positive a nécessairement un volume fini, d'une certaine manière replié sur lui-même, comme le cercle en dimension 1 et la sphère en dimension 2. Mais les espaces hyperboliques, de courbure négative, ou euclidiens, de courbure nulle, admettent aussi bien des topologies finies ou infinies.

Je rappelle que la topologie – qui signifie littéralement : connaissance des lieux – est la branche de la géométrie qui classe toutes les formes possibles d'espaces. J'ai déjà dit aussi que les propriétés géométriques d'un espace se définissent par sa courbure et par sa topologie. Malheureusement, les cosmologistes ont longtemps négligé les subtilités de la topologie, de sorte que la plupart des modèles cosmologiques ne considèrent que la courbure. Ils supposent implicitement que l'espace a la topologie la plus simple possible, dite topologie *monoconnexe*.

Cette simplification est complètement arbitraire et appauvrit considérablement le champ des possibles. Par exemple, nous avons classifié tous les espaces en trois grandes familles de courbure (négative, nulle, ou positive). Mais, à l'intérieur de chaque famille, il existe différentes « classes topologiques ». Par définition, les espaces d'une même classe peuvent se déduire les uns des autres par déformation continue, sans découpage ni déchirure. Dans le cas des espaces à deux dimensions, c'est-à-dire des surfaces, la sphère, par exemple, a la même topologie que n'importe quelle surface de forme ovoïde. Mais le plan a une topologie différente, puisque aucune déformation continue ne peut lui donner la forme d'une sphère.

Des formes fascinantes

Je vais maintenant tenter d'illustrer la différence entre courbure et topologie par des exemples simples.

Je pars du plan euclidien, je découpe une bande et je colle les bords pour obtenir un cylindre. À la surface du cylindre, la géométrie d'Euclide est tout autant vérifiée que dans le plan de départ. Le cylindre est donc une surface euclidienne de courbure nulle. Il présente toutefois une différence fondamentale d'avec le plan : il est fini dans une direction. C'est ce type de propriété qui relève de la topologie, et non pas de la courbure. En découpant le plan et en le recollant selon certains points, je n'ai pas changé sa forme locale – sa courbure – mais j'ai changé radicalement sa forme globale – sa topologie. Je peux aller plus loin en découpant le cylindre en un tube

de longueur finie et en collant les deux extrémités circulaires. J'obtiens un *tore plat*, c'est-à-dire une surface euclidienne sans courbure, mais finie dans toutes les directions, qui ressemble à la surface d'une chambre à air. Une bactérie vivant à la surface d'un tore plat ne ferait pas la différence avec le plan ordinaire, à moins de se déplacer et de faire un tour complet du tore.

À trois dimensions, on peut se livrer à ce même genre d'opérations, même si les possibilités deviennent beaucoup plus nombreuses et compliquées. L'exemple le plus simple est l'hypertore, un espace obtenu en prenant un bloc cubique d'espace euclidien et en collant les paires de faces opposées. En conséquence de quoi, lorsqu'on file en ligne droite, en sortant par une face on rentre immédiatement par celle qui est opposée. C'est, d'une certaine façon, le monde de nombreux jeux vidéo. On comprend immédiatement qu'un tel espace est fini, puisque aucune trajectoire ne peut s'éloigner indéfiniment de son point de départ, mais qu'il n'a pas de courbure ni de bord...

En fait, les topologistes ont démontré qu'il existe dix-huit topologies différentes, qu'on peut appeler aussi formes, pour l'espace euclidien à trois dimensions, dix d'entre elles étant parfaitement finies et sans bord ! Pour les espaces hyperboliques et sphériques, leurs topologies sont en nombre infini, et aucune d'entre elles n'est *a priori* exclue pour la description de l'espace physique.

Il est donc possible d'envisager des modèles cosmologiques qui peuvent être finis ou infinis quelle que soit leur courbure, et qui sont décrits par des formes d'une grande subtilité. Prenons par exemple un polyèdre – c'est-à-dire une figure construite par l'assemblage de faces polygonales. Il se trouve que la plupart des espaces tridimensionnels sont représentables sous forme de polyèdres convexes dont on a collé convenablement les faces deux à deux. On peut, par exemple, construire un espace hyperbolique fini en partant d'un dodécaèdre, c'est-à-dire un polyèdre régulier délimité par douze faces pentagonales, et en collant deux à deux les faces tout en leur faisant subir une rotation de 108 degrés. On démontre que le nouvel espace intérieur au polyèdre est à courbure négative, mais que son volume est fini, car aucune « droite » ne s'éloigne indéfiniment. Encore plus surprenant, en partant d'un même dodécaèdre, mais en collant cette fois les faces opposées après rotation de 36 degrés, on obtient cette fois un espace sphérique, appelé *espace dodécaédrique de Poincaré*. Cela semble compliqué, mais cet espace joue peut-être un rôle fondamental pour la structure de notre univers.

Jeux de miroirs et espace chiffonné

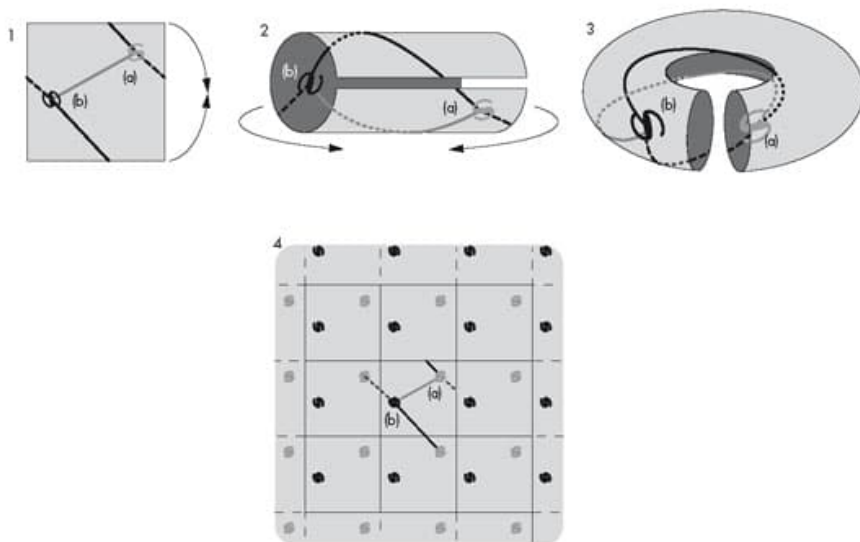
Quelles sont les conséquences de la topologie pour la description

de l'Univers ? Du point de vue topologique, on a vu que le plan et l'espace euclidien ordinaire sont monoconnexes, tandis que le cylindre, le tore, l'hypertore ou l'espace dodécaédrique de Poincaré sont multiconnexes. Or, dans un espace monoconnexe, deux points quelconques sont joints par une seule géodésique (c'est-à-dire l'équivalent d'une droite en espace courbe), tandis que dans un espace multiconnexe, il y a toujours une infinité de géodésiques qui joignent deux points. Cette propriété confère aux espaces multiconnexes un intérêt exceptionnel en cosmologie. En effet, les rayons lumineux suivent les géodésiques de l'espace-temps. Lorsqu'on observe une galaxie lointaine, nous avons coutume de croire que nous la voyons en un unique exemplaire, dans une direction donnée et à une distance donnée. Or, si l'espace cosmique est multiconnexe, la démultiplication des trajets des rayons lumineux donne des images multiples de la galaxie observée. Comme toute notre perception de l'espace provient de l'analyse des trajectoires des rayons lumineux, si nous vivions dans un espace multiconnexe nous serions plongés dans une vaste illusion d'optique nous faisant paraître l'Univers plus vaste que ce qu'il est. Des galaxies lointaines que nous croirions « originales » seraient en réalité des images multiples d'une seule galaxie. Ce serait par exemple le cas dans un hypertore ayant pour rayon quelques milliards d'années-lumière, car en ce cas, les rayons lumineux auraient eu le temps, depuis le Big Bang, de faire plusieurs fois le tour de l'Univers. Celui-ci pourrait donc nous paraître vaste, « déplié », rempli de milliards de galaxies, tandis qu'il serait en réalité plus petit, « replié », ne contenant qu'un plus petit nombre d'objets authentiques. Où serait l'illusion, où serait la réalité ?

J'ai baptisé de tels modèles du nom d'« univers chiffonnés ». Imaginons une pièce tapissée de miroirs sur ses six parois (plancher et plafond compris). Si nous pénétrons dans cette pièce, le jeu des réflexions multiples fait que nous avons immédiatement l'impression de voir l'infini dans toutes les directions, comme si nous étions suspendus au sommet d'un puits sans fond. L'espace cosmique, d'apparence gigantesque, pourrait nous bercer d'une illusion semblable. Bien entendu, il ne possède ni murs ni miroirs, et les images fantômes y seraient créées non par la réflexion de la lumière sur les parois de l'Univers, mais par la démultiplication des trajets lumineux empruntant les « plis » d'un espace chiffonné. Dans un tel modèle, l'espace physique pourrait même être plus petit que l'espace observé. Il jouerait le rôle d'une sorte de cellule fondamentale dans laquelle se trouveraient les objets originaux, les vraies galaxies ; au-delà, les sources que l'on croirait être de plus en plus lointaines ne seraient que des répliques fantômes des sources proches.

Les espaces chiffonnés créent donc un *mirage topologique* qui

démultiplie les images des sources lumineuses. Certains mirages sont déjà bien connus des astronomes sous le nom de « mirages gravitationnels ». Dans ce cas, c'est la courbure de l'espace au voisinage d'un corps massif situé sur la ligne de visée d'un objet plus lointain, qui démultiplie les trajets des rayons lumineux provenant de l'arrière-plan. Nous percevons donc des images fantômes regroupées dans la direction du corps intermédiaire, appelé « lentille ».



Jeux de miroirs

Un univers très simple à deux dimensions, appelé *tore* (3), illustre comment un observateur situé dans la galaxie (b) peut voir des images multiples de la galaxie (a). Ce modèle d'univers « chiffonné » est construit à partir d'un carré (1) dont on a recollé les bords opposés (2) : tout ce qui sort d'un côté réapparaît immédiatement sur le côté opposé, au point correspondant. La lumière de la galaxie (a) atteint la galaxie (b) selon plusieurs trajets, de sorte que l'observateur dans la galaxie (b) voit de nombreuses images de la galaxie (a), réparties dans toutes les directions du ciel. Bien que l'espace du tore soit fini, un être qui y vit a l'illusion de voir un espace, sinon infini (en pratique, des horizons limitent la vue), du moins plus grand que ce qu'il n'est en réalité. Cet espace fictif (4) a l'aspect d'un réseau construit à partir d'une cellule fondamentale, qui répète indéfiniment chacun des objets de la cellule.

Dans le cas du mirage topologique, ce n'est pas un corps particulier qui déforme l'espace, c'est l'espace lui-même qui joue le rôle de la lentille. En conséquence, les images fantômes sont réparties dans toutes les directions de l'espace et toutes les tranches du passé. Ce mirage *global* nous permettrait de voir les objets non seulement sous toutes leurs orientations possibles, mais également à toutes les phases de leur évolution.

La forme de l'espace est-elle inscrite dans le rayonnement fossile ?

La question qui importe maintenant est de savoir comment tester les hypothèses topologiques par des observations astronomiques. Si l'espace est chiffonné, il l'est de façon subtile et sur une très grande taille, sinon nous aurions déjà identifié des images fantômes de notre propre galaxie ou d'autres structures bien connues. Or, ce n'est pas le cas.

Deux familles de tests observationnels ont été proposées, toutes deux fondées sur l'effet de mirage topologique. La première s'applique aux sources lumineuses localisées comme les galaxies, les quasars et les amas de galaxies, réparties en profondeur dans l'espace et dans le temps ; la seconde utilise le *rayonnement fossile*, cette source diffuse dans tout l'espace émise par le plasma chaud de l'univers primitif à une époque unique du passé, et qui nous paraît donc située à la même distance.

Chacune de ces deux familles de tests peut elle-même se subdiviser en deux types : une première méthode tente de reconnaître individuellement des images multiples d'un même objet (mêmes galaxies, mêmes amas, etc., pour les sources localisées, mêmes régions du plasma émetteur pour le rayonnement diffus) ; l'autre, plus puissante, renonce à la reconnaissance individuelle et s'attache exclusivement à mettre en évidence des corrélations statistiques entre les positions des sources de rayonnement. Pour ce qui est des sources localisées, la *cristallographie cosmique* tente de repérer certaines répétitions dans la distribution des objets lointains ; certaines analyses seraient susceptibles de mettre en évidence un signal topologique se superposant au bruit de fond produit par une répartition aléatoire des sources. Hélas, pour l'instant, la profondeur des observations n'est pas suffisante pour tirer des conclusions sur la topologie globale de l'espace à partir de la cristallographie cosmique.

Reste heureusement le rayonnement fossile, cette source diffuse dans tout l'espace émise par le plasma chaud de l'univers primitif à une époque unique du passé, et qui nous paraît donc située à la même distance. Ce rayonnement est le vestige de la première lumière émise peu de temps après le Big Bang, il y a 14 milliards d'années. Il est observé sur la « surface de dernière diffusion », une sphère d'environ 50 milliards d'années-lumière de rayon qui nous entoure. Que le lecteur ne soit pas surpris par ce chiffre : en raison de l'expansion de l'espace, la lumière parcourt plus de 14 milliards d'années-lumière en 14 milliards d'années ; elle en parcourt en fait cinquante ; tout comme la fourmi qui progresse à la surface d'un ballon qui gonfle parcourt une distance effective plus grande que si le ballon ne gonflait pas.

Revenons au rayonnement fossile. Il se caractérise par de minuscules fluctuations d'intensité selon les directions d'observations, qui correspondent en fait à de minuscules fluctuations de température

et de densité du plasma chaud qui l'a émis il y a 14 milliards d'années. En analysant ces fluctuations, les scientifiques peuvent extraire de multiples informations, telles que la densité d'énergie de l'Univers, la répartition entre la matière et l'énergie noire, l'âge de l'Univers, la courbure de l'espace et sa forme globale. C'est ainsi que les données délivrées entre 2003 et 2006 par le satellite WMAP de la NASA, qui ont fourni une carte à haute résolution du rayonnement fossile, indiquent que le paramètre de densité est compris entre 1 et 1,04, une fourchette de valeurs qui favorise plutôt un espace fini à courbure positive, bien que l'espace euclidien (paramètre de densité exactement égal à 1) reste marginalement possible. Mais surtout, une autre mesure de WMAP porte un sérieux coup au modèle d'espace euclidien infini.

Les fluctuations du rayonnement fossile (voir [cahier 1, figure 6](#)) résultent des vibrations acoustiques qui ont traversé le plasma primordial. Il est donc possible de reconstituer la « musique » des débuts de l'Univers à travers un spectre harmonique, de la même façon que le son produit par un instrument de musique est constitué d'une somme d'harmoniques fondamentales. Or les données de WMAP enregistrent un déficit dans les harmoniques de plus grandes longueurs d'onde, par rapport à ce que prévoit le modèle de l'univers infini, comme si les notes les plus graves du cosmos manquaient à l'appel. Pourquoi ? Peut-être simplement parce que l'Univers n'est pas assez grand pour être en mesure de les jouer, à l'instar d'une corde de guitare qui ne peut émettre de son plus grave que ne le permettent sa longueur et son diamètre !

Cette absence de vibrations à très grande échelle m'a ainsi conduit à proposer avec mes collaborateurs une topologie particulière, celle de l'espace sphérique dodécaédrique de Poincaré dont j'ai parlé plus haut². Je rappelle qu'il faut imaginer l'intérieur d'un dodécaèdre tel que lorsque l'on arrive à une paroi pentagonale, on revient dans le dodécaèdre par la face opposée en ayant tourné d'un dixième de tour ([figure](#)).

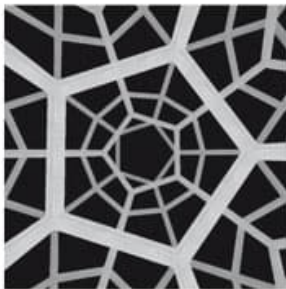
Ce modèle a été étudié mathématiquement en grand détail par plusieurs groupes à travers le monde. Nous avons récemment calculé près de deux milliards de modes vibrationnels de cet espace pour simuler avec précision le spectre harmonique, et nous avons trouvé que le spectre prédit par le modèle s'accorde remarquablement avec le spectre observé par WMAP lorsque le paramètre de densité est égal à 1,018.

Attention, le modèle d'espace dodécaédrique n'est pas une alternative au Big Bang, puisque tout comme l'espace ordinaire il serait rempli de matière et d'énergie noire et en expansion perpétuelle accélérée. Mais c'est un modèle qui remplace l'idée d'un espace infini

par un espace physique fini, sans bord et reconnecté de telle façon que son volume ne représente que 80 % de celui de l'univers observable.

Peut-on aller plus loin ? Oui, car si l'espace physique est plus petit que l'espace observé, il doit y avoir des corrélations particulières dans la carte du rayonnement fossile, à savoir des paires de cercles « homologues » le long desquels les fluctuations de température sont les mêmes, car ils correspondent aux mêmes points physiques observés dans des directions différentes, à cause de l'effet de mirage topologique. La signature précise et définitive de la topologie de l'espace dodécaédrique serait l'existence de six paires de cercles diamétralement opposés dans le ciel, corrélés à une rotation de 36 degrés près.

Reste la question cruciale : ces paires de cercles corrélés sont-elles présentes dans les données réelles de WMAP ? Trois équipes différentes (une américaine, une allemande et une franco-polonaise) se sont penchées sur le problème, en utilisant diverses analyses statistiques et des simulations numériques massives. Aucune réponse claire n'émerge pour l'instant de ces travaux : les uns prétendent qu'il n'y a aucun signal topologique et que le modèle d'univers chiffonné est donc exclu, d'autres prétendent au contraire qu'ils ont trouvé dans les données exactement les six paires de cercles prédites par le modèle dodécaédrique ; d'autres encore ont fait remarquer que le signal topologique ne pouvait de toute façon pas être observé actuellement, car il est dégradé par divers effets cosmologiques et par des imperfections instrumentales.



À gauche : l'espace dodécaédrique de Poincaré (PDS) peut se décrire comme l'intérieur d'un dodécaèdre sphérique tel que, si l'on « sort » par une face pentagonale, on « rentre » immédiatement par la face opposée après une rotation de 36 degrés. Un tel espace est donc fini, bien que sans frontière ni bord, de sorte que l'on peut y voyager indéfiniment sans obstacle. Au centre : vue depuis l'intérieur de PDS perpendiculairement à une face pentagonale. L'observateur a l'illusion de vivre dans un espace cent vingt fois plus grand, construit comme une mosaïque de dodécaèdres empilés dont les images se répètent comme dans une galerie des glaces. À droite : vue depuis l'intérieur de PDS dans une direction arbitraire, calculée par le programme *CurvedSpaces* et montrant des images multiples de la Terre obtenues par mirage topologique (d'après Jeff Weeks).

Alors, vivons-nous dans un espace dodécaédrique de Poincaré, ou

plus généralement dans un univers chiffonné à la topologie bizarre ? Des contraintes expérimentales futures seront nécessaires. Les prochaines années ouvrent justement des perspectives enthousiasmantes ; grâce à de nouveaux télescopes toujours plus perfectionnés, elles permettront à la fois des sondages profonds recensant un très grand nombre d'amas lointains de galaxies et de quasars, ce qui rendra possible de tester la cristallographie cosmique, ainsi que des mesures à haute résolution angulaire du rayonnement fossile qui permettront de déceler peut-être les paires de cercles corrélés.

Je conclurai en remarquant que les modèles d'univers chiffonné font des prédictions accessibles aux instruments de la prochaine génération : une densité d'énergie totale de l'Univers très précise, à un centième près, et un mirage topologique spécifique, que l'on pourra également observer. Contrairement à certaines théories cosmologiques très à la mode comme les supercordes ou l'inflation, le modèle d'univers chiffonné pourra donc être soit réfuté, soit prouvé d'ici quelques années. Nous saurons alors attribuer une forme à l'Univers.

1- Extrait d'une conférence donnée le 23 juillet 2007 à Ajaccio, lors du colloque « L'homme-particules, cycle Science et humanisme ».

2- J.-P. Luminet, J. Weeks, A. Riazuelo, R. Lehoucq et J.-P. Uzan, « Dodecahedral space topology as an explanation for weak wide-angle temperature correlations in the cosmic microwave background », *Nature*, 2003, vol. 425, p. 593.

Planètes et autres petits corps

« On ne sait pas précisément où les anges se tiennent, si c'est dans l'air, dans le vide, dans les planètes : Dieu n'a pas voulu que nous fussions instruits. »

VOLTAIRE,
Dictionnaire philosophique.

Comètes, les vagabondes du ciel¹

Le 7 février dernier, la sonde Stardust (Poussière d'étoile) est partie à la rencontre de la comète Wild-2. Plongeon dans la chevelure et pêche à la poussière (quelques milligrammes) sont prévus pour janvier 2004, retour sur Terre et analyse des échantillons de matière extraterrestre pour 2006².

Dans les dix prochaines années, une flottille de sondes – dont Rosetta, projet de l'Agence spatiale européenne³ – quadrillera le système solaire à la poursuite des astres vagabonds, tantôt effleurant leur noyau, tantôt se posant à même leur surface pour y récolter une matière infiniment précieuse : elle détient en effet la mémoire de notre système solaire primitif, formé il y a 4,56 milliards d'années.

Ainsi, les comètes, ces boules de glaces et de poussières surgies des confins du système solaire et du fond des âges, font plus que jamais rêver les astronomes. Pendant des siècles, elles avaient été synonymes de désolation. Deux millénaires d'une histoire passionnelle qui les a unies aux hommes ont cependant dévoilé peu à peu leurs secrets.

Au IV^e siècle avant notre ère, les Chinois rendent hommage, dans leurs tablettes, à ces « étoiles-balais ». À la même époque, en Occident, les comètes font peur car leur imprévisibilité dérange l'ordre des cieux. Dans la Rome antique, Néron, terrorisé, se suicide peu après le passage d'une comète au-dessus de Jérusalem en 66. On dit aussi que cette peur a inspiré l'Apocalypse selon saint Jean, qui annonce la fin du monde par l'arrivée d'un « astre immense tombant du ciel ». Jusqu'à la fin du Moyen Âge, on n'imagine pas les comètes apportant autre chose que ruine et désastre (étymologiquement, désastre signifie « mauvaise étoile »). Les choses changent progressivement à partir de la Renaissance, grâce notamment aux avancées de Tycho Brahe, Kepler et autres Galilée. En 1687, cinq ans après qu'Edmund Halley eut observé une énorme comète, Isaac Newton démontre que le retour périodique de certaines comètes est dû aux forces d'attraction du Soleil et des planètes. En 1758, le retour de la comète observée soixante-seize ans plus tôt par Halley (laquelle portera désormais son nom) provoque un engouement sans précédent pour ces vagabondes

célestes. Depuis le milieu du XIX^e siècle, leur étude prend un nouveau tournant avec la spectroscopie : c'est elle qui permet de percer les secrets de leur composition. Dans les années 1950, Fred Whipple énonce sa théorie de la « boule de neige sale », selon laquelle la tête de ces bolides est un mélange d'eau congelée, de poussières et de roches. Au même moment prend corps l'idée que le système solaire a pu se développer à partir des comètes. En effet, chargées d'eau mais aussi de matières organiques, ce sont des sources potentielles de vie. En bombardant la Terre primitive et y apportant les éléments essentiels à la vie, elles ont pu jouer un rôle primordial dans nos origines.

La galerie des comètes est inépuisable. On y trouve d'immortelles célébrités (Halley), des stars d'un moment (Hale-Bopp a illuminé nos nuits printanières de 1997), des suicidaires (Shoemaker-Levy 9 a disparu dans les entrailles de Jupiter en juillet 1994), des fidèles (Encke repasse par chez nous tous les trois ans), des inconstantes (Schwassmann-Wachmann 1 a d'imprévisibles sursauts d'éclat).

Depuis 1996, plusieurs observations montrent que des objets célestes peuvent posséder à la fois les caractéristiques d'une comète et d'un astéroïde. Il est vraisemblable que les noyaux cométaires perdent progressivement leurs éléments volatils et finissent par ressembler à des astéroïdes chauves. Le bestiaire des vagabondes célestes s'enrichit alors considérablement. Cent cinquante millions d'objets de plus de 10 mètres de diamètre sillonnent le système solaire. La majorité d'entre eux se trouvent entre Mars et Jupiter, dans la ceinture d'astéroïdes. Environ 500 de ces minuscules planètes tournent sur des orbites très excentriques et peuvent, un jour, croiser celle de la Terre. À cela s'ajoutent environ 500 comètes qui peuvent elles aussi venir frôler la Terre. Au total, il existe donc au moins un millier d'objets menaçants, appelés géocroiseurs. L'un des plus dangereux porte le doux nom d'Éros.

Une grosse météorite, une comète ou un astéroïde peuvent-ils percuter la Terre et faire disparaître ses habitants ? Hélas oui. La probabilité est infime et diminue à mesure que la taille de l'objet augmente, mais elle existe bel et bien. Chaque année, 200 météorites mesurant entre 10 centimètres et 10 mètres atteignent la Terre, mais brûlent en général dans l'atmosphère. Une fois par siècle, un météore de 30 mètres creuse un cratère d'impact (comme le Meteor Crater en Arizona) ou explose à basse altitude (Tunguska, 1908). Tous les 30 000 ans, un météore de 1 kilomètre fait des ravages considérables. Une fois tous les 100 millions d'années (en moyenne, bien entendu), un géant de 10 kilomètres provoque un cataclysme planétaire. La disparition des dinosaures et des micro-organismes marins, il y a 65 millions d'années, est peut-être due à la chute d'un météore, dans

le golfe du Mexique.

On en arrive ainsi au paradoxe ultime : ces comètes et ces astéroïdes qui nous ont donné la vie pourraient fort bien nous la reprendre en une seule fois. Bien que les risques statistiques d'une collision majeure soient faibles, leurs conséquences sont trop importantes pour être ignorées. Plusieurs organismes financent des programmes de surveillance. Le repérage des géocroiseurs est difficile. Les estimations de taille et de trajectoire varient parfois. Et les médias, toujours prompts au sensationnalisme, s'emparent d'informations diffusées sans précaution. Ainsi l'astéroïde 1997-XF-11 a-t-il connu une gloire éphémère en avril 1998. Un astronome américain annonça que cette mini-planète de 2 kilomètres de diamètre allait passer à moins de 40 000 kilomètres de la Terre. Et d'ajouter que « les risques d'une véritable collision étaient faibles mais qu'ils ne pouvaient être totalement écartés ». Du coup, de très nombreux journaux ont consacré leurs gros titres à la fin du monde prévue, avec une impitoyable précision, le 26 octobre 2028, à 18 h 30 GMT. Priés de vérifier les calculs, les chercheurs ont fait savoir vingt-quatre heures plus tard que l'astéroïde 1997-XF-11 passerait à un million de kilomètres de notre planète et que « le risque de collision avec la Terre était équivalent à zéro ». La presse n'a guère fait écho au rectificatif... Le maléfique est souvent préféré au bénéfique.

Pourtant, des planétologues envisagent sérieusement de coloniser certaines comètes pour y implanter une industrie pétrochimique et minière, grâce à laquelle de futures nations pourraient se lancer à la conquête industrielle de Mars. Mieux encore, la planète rouge pourrait être bombardée d'astéroïdes afin d'y recréer les conditions qui ont permis l'apparition de la vie sur la Terre (de l'eau, des molécules organiques et de l'énergie).

Ainsi, l'étude des comètes ne sert pas seulement à prévenir les catastrophes, mais aussi à accélérer la conquête de l'espace.

1- Article paru dans *Le Figaro*, édition du dimanche 14 mars 1999.

2- La mission a été parfaitement réussie. L'analyse des échantillons a notamment montré la présence d'un acide aminé, la glycine, confortant la théorie selon laquelle les comètes auraient pu contribuer à l'apparition de la vie sur Terre [Note ajoutée pour la présente édition].

3- Après un report d'un an dû à une défaillance du lanceur, *Rosetta* a été lancée le 2 mars 2004 et doit arriver à proximité de sa comète-cible en 2014 [Note ajoutée pour la présente édition].

Vénus dans tous ses états¹

L'étoile du Berger

La planète Vénus est, après le Soleil et la Lune, l'astre le plus lumineux de notre ciel. Vue de la Terre, elle ne s'écarte que de 48 degrés au maximum du Soleil ; elle n'est donc visible que le matin ou le soir. De fait, grâce à sa luminosité éclatante, elle est le premier astre qui s'allume au coucher du Soleil et le dernier qui s'éteint dans les lueurs du matin. C'est pour cette raison que Vénus est communément appelée « étoile du berger », bien que cette dénomination soit impropre (voir cahier 1, [figures 7, 8 et 9](#)). Depuis la plus haute Antiquité, les astronomes savent en effet que Vénus est une planète, c'est-à-dire un astre « errant » sur la voûte céleste, et non pas une étoile fixe.

Comme Vénus est observable tantôt en soirée vers l'ouest, tantôt en fin de nuit, vers l'est, de nombreux peuples ont pensé qu'il s'agissait de deux astres différents, tout comme Mercure d'ailleurs. De ce fait, ils lui ont donné deux noms, l'« étoile du soir », ou Vénus vespertine, et l'« étoile du matin », ou Vénus matutine. Ce sont les astronomes grecs qui, les premiers, ont démontré qu'il s'agissait de la même planète.

Même si Vénus s'appelle à peu près partout l'étoile du berger, elle est aussi nommée en Limousin la petite lune, ou le diamant ; en Provence, le flambeau ou la belle étoile, à cause de son éclat ; en Ille-et-Vilaine, c'est l'étoile des jeunes filles, parce qu'elle marque qu'il est temps pour elles de rentrer à la maison. Dans le Midi, Vénus, qui éclaire les bergers le matin quand ils sortent le troupeau et le soir quand ils le rentrent, est appelée la Bello Magaluno ; c'est la belle Maguelonne qui court après Pèire de Provenço, Pierre de Provence, autrement dit Saturne, et se marie avec lui tous les sept ans. Ces rencontres amoureuses, censées correspondre à de très proches conjonctions entre les planètes Vénus et Saturne vues depuis la Terre, dénotent en réalité des observations astronomiques très imprécises : en effet, les conjonctions proches de ces deux astres n'obéissent nullement à une telle périodicité.

Notons enfin que, dans les langues latines, Vénus a donné son

nom au jour de « vendredi », tout comme le lundi est celui de la Lune, mardi celui de Mars, etc.

Les amours de Vénus

Sur le plan mythologique, Vénus est très généralement associée à la déesse de l'amour, et ce indépendamment des cultures et des civilisations. Cela tient probablement à son éclat incomparable.

Ainsi, dès l'origine de notre civilisation, à Sumer, la planète Vénus s'incarnait en Inanna, déesse ailée de l'amour et de la guerre, puissance de la vie et de la mort. Inanna, qui signifie la « dame du ciel » ou la « mémoire du temps », est la divinité féminine la plus intéressante et la plus populaire de la Mésopotamie antique. Vierge guerrière souvent représentée avec son arc et son carquois, prônant tantôt l'amour libre tantôt la discorde, Inanna est symbolisée dans les bas-reliefs par une étoile. Elle fit plus tard la gloire de l'Assyrie, devenant l'alibi de la barbarie de ses rois. Toujours amoureuse et vierge, elle retrouvait sa virginité en se baignant dans un lac.



Inanna au milieu des autres dieux. Bas-relief, Mésopotamie.

La religion mésopotamienne au I^{er} siècle avant notre ère est un héritage des Sumériens, qui ont légué leurs dieux à leurs successeurs sur le territoire, ceux-ci les adoptant tels quels, changeant seulement leurs noms. Inanna est ainsi devenue la célèbre Ishtar.

Ishtar était la déesse la plus vénérée par les Mésopotamiens. Chaque grande ville lui dédiait un ou plusieurs temples, qui étaient tous très visités. Le syncrétisme lui a donné plusieurs attributs. Au départ, Inanna était la déesse de l'amour des Sumériens, et Ishtar a repris ces caractéristiques pour devenir la déesse de la discorde et de la guerre chez les Akkadiens. Elle a de plus été assimilée à la divinité babylonienne Delebat. Au cours de l'histoire religieuse mésopotamienne, Ishtar a peu à peu absorbé toutes les autres divinités féminines, notamment la principale déesse sumérienne, Ninhurshag, devenant ainsi la déesse de la fécondité et de la fertilité. Ishtar a ensuite transmis tous ces traits à la déesse phénicienne Ashtarté, puis à l'Aphrodite des Grecs et à la Vénus des Romains.

Aphrodite, ou Vénus, est donc la déesse gréco-romaine de l'amour et de la beauté. Elle est née du sang tombé dans la mer quand Chronos (le Saturne des Romains) a châtré Ouranos (le Ciel). Ce sang a fécondé les flots, et Aphrodite a surgi du creux d'une vague, aussi blanche et aussi belle que l'écume. Zéphyr, le vent embaumé de l'Ouest, la posa délicatement dans une conque de nacre et l'emmena sur l'île de Chypre (voir [cahier 1, figures 10 et 11](#)). Dès qu'elle mit pied à terre, l'herbe et les fleurs poussèrent sous ses pas. Depuis, Aphrodite a le pouvoir de fertiliser les champs.

Le jour où Aphrodite parut à l'Olympe, tous les dieux furent transportés d'admiration devant elle. Il n'y eut aucune hésitation : Aphrodite devint la déesse de la beauté et de l'amour et, par conséquent, de l'art et de la volupté. Dès lors, l'amour, dont elle est l'incarnation divine, a régné sur les dieux et les hommes. Elle symbolisait la passion que rien n'arrête et qui rend fous d'amour ceux qu'elle veut perdre. L'image archétypale de Vénus est celle d'une jeune femme vigoureuse et nue (voir [cahier 1, figures 12-13](#)). Amoureuse de la bonne chère, du confort et du plaisir, elle abhorrait privations et laideur. Elle personnifiait les pouvoirs de l'instinct, l'attraction et la répulsion. Elle régna sur l'amour, la passion, les infidélités, les mariages et les ententes. Elle seule sut insuffler les caprices, la sensualité et le désir en tout être vivant, touchant en cela même autant les dieux que les mortels.

Malgré ses innombrables aventures amoureuses, Aphrodite-Vénus n'eut qu'un seul mari, le plus laid de tous les dieux : Héphaïstos (le Vulcain des Romains). Voici leur plaisante histoire.

Dans le palais de l'Olympe, l'entente entre Zeus (Jupiter), le dieu des dieux, et son épouse, la terrible et jalouse Héra (Junon), était loin d'être parfaite et les sujets de dispute étaient nombreux. Aussi, lorsque Zeus mit au monde Athéna, la déesse de la guerre, en la faisant jaillir de son crâne et donc, en principe, sans l'intervention d'un quelconque élément féminin, Héra, ne voulant pas être en reste, se vengea en donnant naissance à Héphaïstos sans l'intervention d'aucun mâle.

Hélas, l'enfant ne fut pas très réussi. Ses traits étaient si disgracieux et son corps si difforme qu'il fit peur à sa propre mère. Celle-ci se saisit de l'enfant et le jeta hors du palais de l'Olympe. Le bébé virevolta dans l'air pendant plusieurs heures et tomba si violemment qu'il en devint boiteux.

Il fut recueilli par des Naiades, qui l'élevèrent comme leur enfant dans une grotte sous-marine. Là, le petit dieu apprit l'art de la forge.

Lorsqu'il atteignit l'âge adulte, Héphaïstos décida de se venger de sa mère et la fit prisonnière grâce à un subtil stratagème. Héra supplia son fils de la délivrer, mais elle n'obtint gain de cause qu'après lui avoir promis de lui installer sa propre forge et de le marier à une très

belle femme.

Héra accueillit donc Héphaïstos et réalisa son premier souhait en lui aménageant une forge dans un splendide palais. Elle tint ensuite sa deuxième promesse, en arrangeant son mariage avec la belle Aphrodite. La déesse de l'amour accepta cette union, sachant que la laideur de son mari lui servirait d'excuse à ses multiples infidélités conjugales. La belle menait en effet une vie sentimentale très dissolue. Peu farouche, elle avait des aventures avec de nombreux dieux, qui se disputaient des faveurs qu'elle offrait d'ailleurs généreusement. Elle eut ainsi une importante descendance avec des dieux, et elle aima même un certain nombre de mortels, comme Adonis et Anchise.

Aphrodite eut surtout une liaison suivie avec Arès (le Mars des Romains), dieu de la guerre (voir [cahier 1](#), [figure 14](#)). Les deux amants se voyaient régulièrement pendant que le pauvre dieu des forgerons travaillait dans sa forge en suant à grosses gouttes. Héphaïstos ne se doutait de rien, étant même persuadé que la déesse de l'amour ne pouvait le trahir.

C'est Hélios, le dieu Soleil, qui lui ouvrit un jour les yeux. Sur le moment, Héphaïstos se lamenta sur son sort, mais il se ressaisit bien vite et décida de mettre un terme de façon éclatante à la liaison entre sa femme et le dieu de la guerre. Il s'enferma dans sa forge et se lança dans la fabrication d'un filet métallique dont la texture et les mailles étaient si fines qu'il était totalement invisible. Le dieu des forgerons installa son filet au-dessus du lit conjugal et attendit le soir. Son filet était muni d'un mécanisme qui, dès qu'il était enclenché, le faisait tomber du plafond pour emprisonner toute personne se couchant dans le lit.

Héphaïstos fit croire à sa femme qu'il partait en voyage, mais il revint subrepticement dès la première nuit et, lorsqu'il se présenta dans la chambre, Arès et Aphrodite, entièrement nus mais entrelacés dans les mailles du filet, se débattaient, cherchant à se dépêtrer du piège invisible. Ils eurent beau supplier Héphaïstos de leur faire passer au moins leurs vêtements, celui-ci refusa tout net. Au contraire, il se rendit sur le mont Olympe, rencontra tous les dieux et les invita à venir chez lui pour assister à l'un des plus beaux spectacles qu'il leur ait été donné de voir. Les dieux ne se firent pas prier. Quant aux déesses, elles déclinèrent poliment l'invitation.

Tous les dieux rirent, bien sûr, mais davantage du mari trompé que d'Aphrodite et d'Arès. Finalement, Héphaïstos libéra les deux amants, qui cessèrent pour un temps leur relation. Aphrodite resta avec son mari, car il n'y a jamais eu de divorce sur l'Olympe. Cependant elle poursuivit ses libertinages. Elle eut avec Mars-Arès trois fils nommés Phobos (la peur), Deimos (la terreur) et Éros (l'amour).

Astronomiquement parlant, il est amusant de constater que Phobos et Deimos sont d'anciens astéroïdes capturés par Mars et qu'ils en sont aujourd'hui les deux satellites naturels, ne présentant aucun danger pour les Terriens. En revanche, Éros est un astéroïde vagabond de type géocroiseur, c'est-à-dire qu'il s'approche parfois de façon inquiétante de notre planète Terre.

Les deux visages de Vénus

Vénus joue également un rôle dans la mythologie chrétienne. L'apôtre Pierre compare en effet Jésus-Christ à la planète qui nous occupe lorsqu'il écrit dans sa deuxième épître : « [...] Jusqu'à ce que le jour vienne à paraître et que l'étoile du matin se lève dans vos cœurs. » Dans la tradition chrétienne, si, dans sa divinité, le fils de Dieu a pour emblème le Soleil, en s'incarnant et en devenant homme, il a voulu occuper une simple place parmi les milliers d'étoiles qui piquent la voûte obscure des nuits. Cependant, Jésus, dans sa perfection morale, se révèle comme le plus beau des fils de l'homme ; si Vénus attire immédiatement le regard de celui qui se promène dans la nuit, Jésus se détache magnifiquement parmi toutes les figures de l'humanité. Pour le croyant, il est donc bien comparable à l'étoile du matin, en ce que son retour préludera la fin de la nuit et l'éclat du jour où le règne de Dieu sera instauré de façon visible sur Terre. En outre, étant lui-même le bon berger, son « étoile » guide le fidèle sur le chemin obscur.

La partie la plus intéressante de l'histoire tient au fait que nombre de symboles de la Bible, tout comme dans nombre de textes sacrés d'autres religions, ont une double face. Par exemple le feu est emblème de force mais aussi de jugement. Vénus n'échappe pas à cette réversibilité. Tous les anciens sémites estimaient que la planète Vénus avait deux aspects complémentaires. Chez les Babyloniens, Ishtar d'Akkad, la Vénus masculine, étoile du matin, représentait l'amour passionné et agressif, tandis que l'étoile du soir, Ishtar d'Ourouk, la Vénus féminine, représentait l'amour tendre et romantique. Chez les Cananéens, Vénus était Shahr (le dieu de la guerre) le matin et Shalim (le dieu de la paix) le soir. Chez les Grecs, Vénus était Phosphoros (le porte-lumière) le matin et Hesperos (l'étoile du couchant) le soir. Enfin chez les Romains, Vénus matutine était Lucifer et Vénus vespertine Vesper.

Pour les chrétiens, Lucifer, le porteur de lumière, a une résonance sinistre. Les Écritures indiquent quelques éléments relatifs à l'ange déchu, celui qui était la plus belle des créatures de Dieu et qui s'est, par orgueil, révolté contre lui. Ainsi a prophétisé Isaïe : « Te voilà tombé du ciel, Astre brillant, fils de l'aurore ! Tu es abattu à terre, toi,

le vainqueur des nations ! »



Ishtar d'Akkad, étoile du matin.



Ishtar d'Ourouk, étoile du soir.

Nul doute que certains fidèles aient pu être confortés dans leurs croyances lorsque les sondes spatiales modernes se sont posées pour la première fois sur la planète Vénus, et y ont découvert à quoi pourrait ressembler l'Enfer si c'était un lieu physique : une température de 400 °C, une atmosphère chargée de gaz carbonique et d'acide sulfurique soumise à une effrayante pression distordant les images, des paysages de désolation où toute espérance de vie est bannie !

Vénus en Amérique

Parmi les grandes civilisations qui se sont développées sur le continent américain avant l'arrivée des conquistadors, la plus brillante fut certainement celle des Mayas. Les réalisations culturelles (en architecture, sculpture, etc.) de ce peuple s'étendent sur une période allant du tout début de notre ère jusqu'au début du XVI^e siècle.

Les Mayas, comme les autres peuples précolombiens, étaient très intrigués par les phénomènes célestes et tout particulièrement par le mouvement des astres : le Soleil, la Lune et la planète Vénus qui est très visible sous ces latitudes.

Ils dressèrent des tables très précises des positions de ces astres, comme l'atteste le codex Grolier, découvert récemment dans une caisse en bois, dans une caverne du Chiapas. En piètre état et contenant la moitié d'une table de vingt pages traitant des mouvements de la planète Vénus, il est daté de 1230 après J.-C., ce qui en fait le plus ancien des codex connus d'avant la conquête par les Espagnols.

Les Mayas possédaient deux calendriers très perfectionnés. Un calendrier solaire, dont le début était marqué par la position zénithale du Soleil, le 16 juillet, et qui comportait 365 jours, répartis en 18 mois

de 20 jours plus 5 jours. Celui-ci, par rapport à la durée sidérale de révolution de la Terre autour du Soleil, présentait un décalage de seulement 0,000302 an !

Quant au calendrier rituel qui possédait 260 jours, découpés en 13 périodes de 20 jours, il se basait sur la révolution de Vénus autour du Soleil : l'erreur de synchronisation n'était que de 1 jour sur 6 000 ans.

Les Mayas exprimaient les dates dans les deux calendriers. Le calendrier maya, très complexe, est resté le plus fiable de tous les calendriers jusqu'à l'avènement du calendrier grégorien au XVI^e siècle. Les visées et calculs astronomiques mayas sont presque aussi précis que ceux de l'Europe, alors qu'ils étaient obtenus par des moyens bien plus simples, comme la mesure des ombres portées et la triangulation.

Un mystère subsiste : la première année du calendrier maya correspond à 3113 av. J.-C., alors que la civilisation maya proprement dite ne semble débiter que peu avant notre ère. Il s'agit peut-être de la trace d'une cosmogonie perdue, dans laquelle cette date représenterait celle de la création du monde.

Vénus joue aussi un rôle chez les Aztèques, en tant que sœur jumelle de leur principale divinité : Quetzalcóatl, dieu précolombien et héros légendaire, dont l'incarnation principale était celle du « serpent à plumes ». D'après les légendes recueillies au XVI^e siècle par les conquistadors, Quetzalcóatl était à la fois un sorcier, un roi et un prêtre qui gouverna la cité toltèque de Tula au XI^e siècle. Il inventa le calendrier, les arts et les techniques de l'agriculture. Son peuple était riche et puissant. En tant que dieu, il présidait aux cycles du temps ainsi qu'à l'aube et au crépuscule, en raison de son association avec la planète Vénus, sa sœur jumelle. En outre, Quetzalcóatl aurait recréé l'homme après le premier déluge, à partir d'ossements humains divers mêlés à son sang divin.

L'idée d'un lien entre Vénus et la création de l'humanité se retrouve dans la mythologie des Pawnees, une tribu indienne du Nebraska ayant vécu dans les grandes plaines d'Amérique du Nord.

Dans leur cosmogonie, au commencement de tout, le ciel était habité par un grand chef nommé Tirawa. Un jour, Tirawa décida de créer la Terre et les hommes. Pour cela, il demanda au Soleil de se placer à l'est pour donner la lumière et la chaleur et envoya la Lune à l'ouest pour éclairer la nuit. L'Étoile brillante, plus connue sous le nom d'étoile du soir (donc, pour nous, Vénus vespertine), fut chargée de créer les hommes. Quant à la Grande Étoile, celle qui apparaît le matin (Vénus matutine), elle devait les protéger en restant à l'est.

Quand tout fut en place, Tirawa dit à l'étoile du soir : « Je vais t'envoyer les nuages, les vents, les éclairs et le tonnerre, et lorsque tu

les auras reçus, tu les placeras près du jardin céleste. » Aussitôt, les vents se mirent à souffler, les éclairs et le tonnerre pénétrèrent dans les nuages en train de se rassembler. Tirawa laissa alors tomber un gros caillou qui traversa l'épaisseur nuageuse, laissant apparaître une immense étendue d'eau. Il donna ensuite aux quatre étoiles du ciel de grosses masses pour frapper les eaux ; celles-ci se séparèrent, et la Terre apparut. Alors, Tirawa et les Indiens du ciel se mirent à chanter pour célébrer la création de la Terre, et les éléments commencèrent à bouger. Au quatrième chant, des graines de toutes sortes germèrent et enrichirent la terre.

Alors, Tirawa retourna voir l'étoile du soir et il lui dit : « Maintenant que la Terre est là, tu peux créer les hommes. Pour cela il faut que tu t'unisses à l'étoile du matin. » Ce qu'ils firent sans protester, et ils conçurent une fille. Tirawa demanda la même chose au Soleil et à la Lune, et ils conçurent un garçon. Les deux enfants grandirent ensemble et Tirawa leur enseigna les secrets de la nature. Un jour enfin, les deux enfants furent prêts à descendre sur Terre pour la peupler, et ils créèrent l'humanité.

Les phases de Vénus

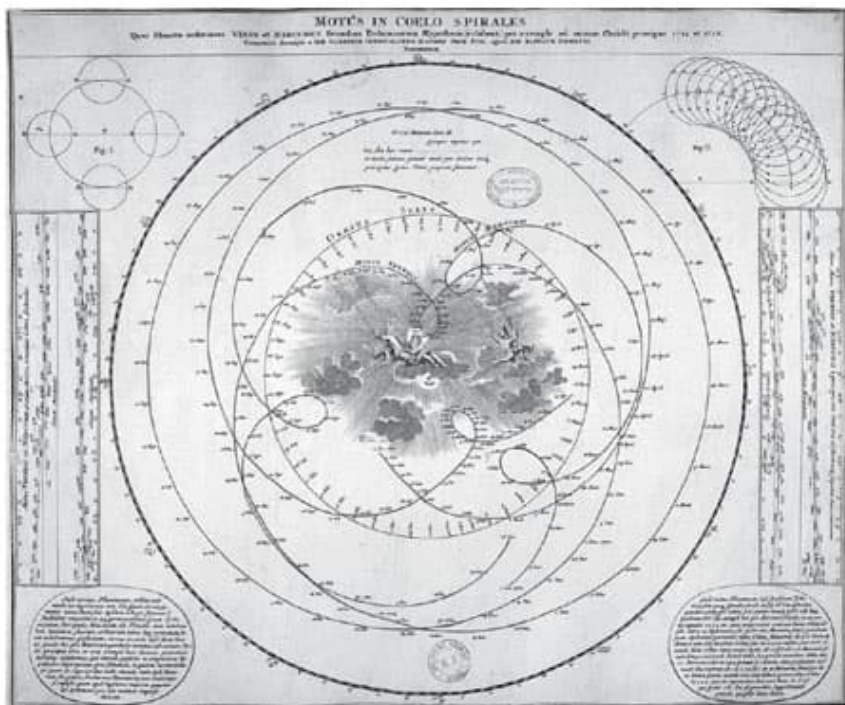
Quittons la mythologie pour en venir à l'histoire plus récente. Vénus a joué un rôle important dans l'histoire de l'astronomie. En tant que planète intérieure, elle présente en effet des *phases*, c'est-à-dire des aspects successifs de son disque, selon sa position relative à la Terre et au Soleil. Or ce furent les premières observations télescopiques de ce phénomène par Galilée qui constituèrent une preuve importante en faveur de la théorie héliocentrique du système solaire, proposée par Nicolas Copernic en 1543. En effet, les phases de Vénus s'expliquent plus facilement si elle tourne autour du Soleil, et non pas autour de la Terre comme on le croyait depuis l'Antiquité. Ayant appris en 1609 l'existence d'un instrument optique permettant de grossir ce que l'on regarde, Galilée s'empressa de le reproduire en l'améliorant, puis pointa cette lunette vers le ciel. Il fit état des résultats de ses observations dans *Le Messager céleste* (1610). Comme l'écrivit plus tard Gudin de la Brunellerie dans son poème didactique *L'Astronomie* (1810), à propos de Galilée :

« Le premier de Vénus il vit les changements,
Ses phases, sa rondeur, l'éclat de ses croissants. »

Les implications astronomiques des phases de Vénus furent bien comprises par l'écrivain Cyrano de Bergerac. Dans un texte superbe, extrait des *États et Empires du Soleil* (1662), il écrivit :

« Je côtoyai la Lune qui pour lors se trouvait entre le Soleil et la

Terre, et je laissai Vénus à main droite. Mais à propos de cette étoile, la vieille astronomie a tant prêché que les planètes sont des astres qui tournent à l'entour de la Terre, que la moderne n'oserait en douter. Et je remarquai toutefois, que durant tout le temps que Vénus parut au-deçà du Soleil, à l'entour duquel elle tourne, je la vis toujours en croissant ; mais achevant son tour, j'observai qu'à mesure qu'elle passa derrière, ses cornes se rapprochèrent, et son ventre noir se redora. Or cette vicissitude de lumières et de ténèbres montre bien évidemment que les planètes sont comme la lune et la terre, des globes sans clarté, qui ne sont capables que de réfléchir celle qu'ils empruntent. »



Les mouvements des planètes inférieures Vénus et Mercure, dans l'atlas de Doppelmayr (1742).

Vénus et les poètes

Comme je viens de mentionner Cyrano de Bergerac, grand poète de l'utopie, il tombe à propos de rappeler combien Vénus, en tant que planète, a été chantée par les poètes.

Symbole de la beauté, déesse de l'amour, étoile des douces confidences, c'est ainsi que la comprend William Blake (1757-1827) dans son poème de jeunesse *À l'étoile du soir* :

« Bel ange aux cheveux blonds, ange du soir, allume,

Tandis que le soleil repose sur les monts,
Ta brillante torche d'amour. Mets ta radieuse
Couronne, puis souris sur notre lit du soir !
Souris à nos amours et, tout en refermant
Les bleus rideaux du ciel, verse ton argentine
Rosée sur chaque fleur qui clôt ses tendres yeux
Quand il sied. Sur le lac, que dorme ton vent d'ouest ;
Que tes yeux scintillants nous parlent de silence ;
Baigne d'argent le crépuscule. Tôt, très tôt,
Tu nous quittes ; alors le loup cervier fait rage
Et l'œil du lion flamboie dans la brune forêt :
Protège par ton influence nos ouailles
Dont ta sainte rosée imprègne les toisons. »

Au XX^e siècle, Blaise Cendrars (1887-1961), bourlingueur des mers australes et grand contemplateur des nuits étoilées, n'en retient dans ses *Feuilles de route 1924-1928* que l'aspect astronomique éclatant :

« Je passe la plus grande partie de la nuit sur le pont
Les étoiles familières de nos latitudes penchent sur le ciel
L'étoile polaire descend de plus en plus sur l'horizon nord
Orion – ma constellation – est au zénith
La Voie Lactée comme une fente lumineuse s'élargit chaque nuit
Le Chariot est une petite brume
Le sud est de plus en plus noir devant nous
Et j'attends avec impatience l'apparition de la Croix du Sud à l'est
Pour me faite patienter Vénus a doublé de grandeur et quintuplé d'éclat
Comme la lune elle fait une traînée sur la mer
Cette nuit j'ai vu tomber un bolide. »

En 1950, dans son étonnante *Petite Cosmogonie portative*, Raymond Queneau (1903-1976) a consacré à la « tribu docile » des planètes quelques vers mystérieux et provocants. Le sujet qui nous occupe est abordé dans le seul vers n° 180, où Mercure est traité de commerçant rêveur et Vénus de putain endormie.

Dans son recueil *Gravitations* (1925), Jules Supervielle (1884-1960) dédie à Vénus un fascinant poème intitulé *Planète* :

« Le Soleil sur Vénus se lève ;
Sur la planète un petit bruit.
Est-ce une barque qui traverse
Sans rameur un lac endormi,
Est-ce un souvenir de la Terre
Venu gauchement jusqu'ici,
Une fleur tournant sur sa tige
Son visage vers la lumière
Parmi ces roseaux sans oiseaux
Piquant l'inhumaine atmosphère ? »

L'idée qu'une vie animale ne puisse exister sur Vénus en raison d'une « inhumaine atmosphère » semble être une prémonition de poète, par rapport à ce qu'allait découvrir plus tard l'exploration spatiale. En effet, recouverte d'un voile atmosphérique épais, Vénus ne

laissait rien voir de son anatomie aux télescopes, ce qui laissait le champ libre à l'imagination. Alors que Mars était jugée vieille et « usée », Vénus était vue comme une planète jeune (nous savons aujourd'hui que les planètes du système solaire ont le même âge).

De même taille que la Terre mais plus près du Soleil, Vénus aurait pu être un véritable paradis, et nombre de gens sérieux des siècles passés imaginaient une planète idyllique, au climat chaud et exempt des frimas terrestres. Certes, les Vénusiens n'ont jamais été aussi populaires que les Martiens. Toutefois, Camille Flammarion, estimant qu'ils devaient offrir des ressemblances physiques avec la Terre, en avait déduit que le peuple de Vénus devait présenter les plus grandes ressemblances morales avec le nôtre. Hélas, les premières missions spatiales ont vite fait déchanter tous ceux qui espéraient découvrir de belles Vénusiennes se prélassant sur des plages baignées par des mers éternellement chaudes ou folâtrant dans des prairies accueillantes, recouvertes de fougères arborescentes et de fleurs multicolores géantes. Le 12 décembre 1962, la sonde Mariner a brusquement brisé le rêve vénusien en révélant sa vraie nature. Vénus est un enfer stérile, brûlant à 400 °C, balayée par des vents d'acide sulfurique. Aucune créature aimante ne pourra jamais y poser le pied².

Les mensurations de Vénus

Vénus est la deuxième planète du système solaire par ordre croissant des distances au Soleil et la sixième planète par ordre croissant de taille. Avec une excentricité de moins de 1 %, son orbite est la plus circulaire des orbites planétaires du système solaire. À son périhélie, elle est à 107 millions de kilomètres de l'étoile, alors qu'à l'aphélie, elle ne s'en éloigne que de 109 millions. Dans sa révolution, elle fonce à une vitesse de 35 kilomètres à chaque seconde. Ainsi, elle parcourt son orbite de 680 millions de kilomètres de circonférence en 225 jours. C'est la durée de l'« année vénusienne ».

Comme Mercure, Vénus ne possède pas de satellite naturel. Sa densité est à peine plus faible que celle de la Terre et de Mercure et vaut 5,25 contre 5,52 pour la Terre et 5,45 pour Mercure. Avec ses 12 104 kilomètres de diamètre, Vénus est sensiblement de la même taille que notre planète, qui ne mesure que 656 kilomètres de plus. C'est une boule parfaitement ronde : son aplatissement est nul aux pôles en raison de sa rotation très lente. Vénus ne possède pas non plus de champ magnétique, toujours à cause de sa lente rotation.

La rotation de Vénus est inhabituelle parce qu'elle est non seulement très lente (sa période de rotation sidérale de 243 jours terrestres est même plus longue que sa période de révolution, ce qui signifie que sur Vénus, le « jour » est plus long que l'« année »), mais

aussi parce qu'elle est rétrograde. De plus, la synchronisation particulière de la période de rotation de Vénus avec sa période de révolution est telle que Vénus présente toujours la même face à la Terre quand elle est au plus près de celle-ci.

Vénus est souvent considérée comme la jumelle de la Terre. Les deux planètes ont en effet beaucoup de points communs :

- Vénus est à peine plus petite que la Terre (95 % du diamètre terrestre et 80 % de sa masse).

- Les deux planètes possèdent peu de cratères, indiquant que leurs surfaces sont relativement jeunes.

- Leurs densités et leurs compositions chimiques sont similaires.

Ces ressemblances avaient conduit les astronomes à penser qu'en dessous de ses nuages denses, Vénus aurait pu être très semblable à la Terre, et même héberger la vie. Comme on l'a vu, les études plus poussées ont montré qu'elle était en réalité radicalement différente. Certes, au début de son histoire, Vénus possédait sans doute de grandes quantités d'eau, mais celles-ci se sont entièrement évaporées. C'est maintenant une planète désertique.

Si la Terre s'était trouvée juste un peu plus proche du Soleil, son évolution aurait peut-être été semblable à celle de Vénus. On apprendra probablement beaucoup au sujet de la Terre en étudiant pourquoi ces deux planètes au départ jumelles sont devenues si différentes.

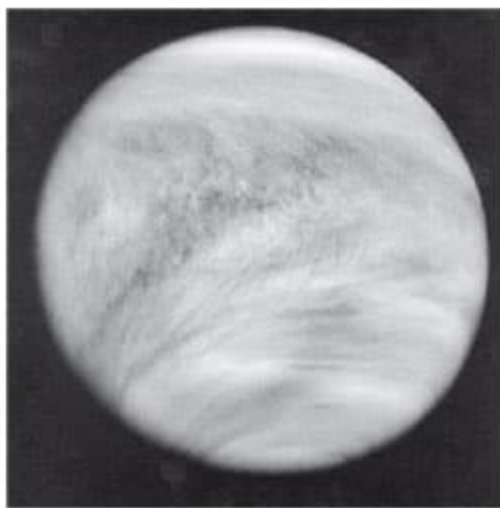


Image astronomique de Vénus

Les voiles étouffants de Vénus

Si l'Enfer existait, ce serait certainement sur Vénus. La planète

baigne dans une atmosphère de gaz carbonique si dense qu'un puissant effet de serre élève la température au sol à 400 °C, et jusqu'à 460 °C au plus fort de la journée (ce qui est assez chaud pour faire fondre le plomb). La surface de Vénus est donc plus brûlante que celle de Mercure, bien qu'elle soit deux fois plus éloignée du Soleil.

Cette température s'accompagne d'une pression atmosphérique cent fois plus forte que sur Terre et, sous les 70 kilomètres des lourds et opaques nuages permanents, elle correspond à celle qui règne, chez nous, sous 1 000 mètres d'eau.

Tout être vivant serait, sur Vénus, asphyxié par l'air, cuit par la chaleur et broyé par la pression atmosphérique, perspective qui laisse peu de place à l'espoir d'une future expédition humaine, même chez les visionnaires les plus optimistes.

Sur vingt-cinq missions spatiales, seules quatre sondes soviétiques, Venera 9, 10, 13 et 14, ont réussi l'exploit, dans les années 1980, de franchir tous les obstacles dus à la température et à la pression pour arriver au sol en état de marche. Fonctionnant pendant un laps de temps relativement court (de 53 minutes pour Venera 9 à 2 h 7 mn pour Venera 14), elles ont transmis aux Terriens de précieuses informations sur la deuxième planète la plus proche du Soleil.

Les nuages sont trop épais pour que l'on aperçoive le soleil, ne serait-ce qu'un instant. L'air est immobile, les plus puissantes tornades produisant au sol des vents de seulement 4 kilomètres par heure. Seuls, dans ce paysage fantomatique, quelques coups de tonnerre d'un invisible orage percent le silence pesant. Lorsque la nuit arrive, la température ne baisse guère et d'éventuels Vénusiens ignoreraient tout des étoiles, le ciel étant en permanence couvert d'impressionnants et épais nuages.

L'atmosphère brûlante de Vénus est composée à 96 % de dioxyde de carbone, le reste étant principalement de l'azote. L'air est extrêmement sec, sans la moindre présence de vapeur d'eau. Au fur et à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, la pression baisse mais la température reste désespérément haute. Ainsi, à 11 000 mètres, au sommet de Maxwell Montes, la montagne la plus élevée de Vénus, la température avoisine 400 °C. À 45 kilomètres, la pression atmosphérique équivaut à celle qui règne sur la Terre, mais la température atteint tout de même 100 °C. Alors qu'au sol, aucune brise ne soulève la poussière, à cette altitude les vents se déchaînent, dépassant les 300 kilomètres à l'heure avec, pour parachever l'ambiance, une pluie corrosive de gouttelettes d'acide sulfurique. Enfin le zéro degré est atteint à 60 kilomètres au-dessus du sol alors qu'à 70 kilomètres, au sommet des nuages, la température avoisine les - 40 °C.

La circulation atmosphérique est une autre des particularités de Vénus. Au niveau du sol, l'atmosphère est lourde et pratiquement immobile car elle est asservie par la rotation extrêmement lente de la planète. Comme on l'a déjà vu, les vents ne dépassent guère 4 kilomètres par heure. Au contraire, en altitude, l'atmosphère est infiniment moins dense et tourne en seulement 4 jours. Les tempêtes y sont effroyables et distordent les couches atmosphériques en produisant une formation en Y, très caractéristique, observable sur les clichés des couches externes de la planète.

L'anatomie détaillée de Vénus

L'épaisse couche nuageuse de l'atmosphère vénusienne empêche toute observation visuelle de la surface, et seule une cartographie de la planète par radar est possible. Entre 1990 et 1993, la sonde américaine Magellan a réussi l'exploit technique de se placer sur une orbite au-dessus de Vénus et de percer le secret de son sol invisible, en transperçant les nuages, grâce à des ondes radar. La planète a été cartographiée à 93 % et d'impressionnants clichés ont pu nous parvenir.

Vénus est formée par une immense plaine monotone constituée de roches basaltiques avec, de-ci, de là, quelques collines peu élevées et d'innombrables failles et gorges témoignant d'une intense activité géologique. Trois grands massifs montagneux rompent la monotonie du paysage. Le long de l'équateur, Aphrodite Terra mesure 3 000 kilomètres de long et culmine à plus de 5 000 mètres. Au nord, Bêta Regio s'élève à 4 000 mètres tandis que, près du pôle nord, Ishtar Terra s'élève à 5 000 mètres. C'est sur Ishtar Terra que l'on trouve Maxwell Montes, qui culmine à 11 000 mètres et couvrirait, à sa base, les deux tiers de la France.

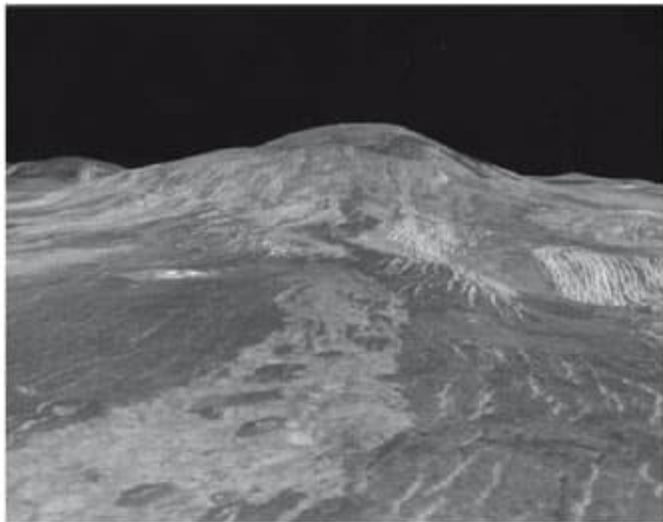
Comme Vénus est dotée d'une très épaisse atmosphère, les météorites ont bien du mal à atteindre le sol, si bien que cette planète est mille fois moins cratérisée que Mercure ou que la Lune. Sur Vénus, seuls les météorites d'une taille supérieure à 50 ou 100 mètres peuvent atteindre le sol. Ainsi les cratères d'impact les plus petits, centimétriques sur la Lune ou Mercure, mesurent au minimum 2 kilomètres sur Vénus. Les deux formations les plus caractéristiques sont Cléopâtre, cratère météoritique que l'on trouve non loin de Maxwell Montes et qui mesure 105 kilomètres de diamètre, et Sacajawea Patera, immense cirque de 200 kilomètres de diamètre, bordé de montagnes circulaires et situé à l'ouest d'Ishtar Terra.



Relief de Vénus cartographié par la sonde Magellan.

Sur Vénus, on rencontre de nombreux volcans, essentiellement près de l'équateur, dans la région Alpha Regio où sept larges dômes de 25 kilomètres de diamètre culminent à quelque 750 mètres à peine. Ce sont des volcans de type bouclier semblables à ceux d'Hawaii sur Terre et à l'Olympus Mons de Mars. Partout sur cette planète, on rencontre d'anciennes coulées de lave, témoignant d'une intense activité volcanique. Niobe Planitia, qui s'étire sur 7 000 kilomètres, est la plus longue coulée de lave que l'on ait trouvée dans le système solaire.

Des découvertes récentes ont permis de conclure que Vénus possède toujours une activité volcanique, mais seulement en quelques points particuliers de la planète. En gros, du côté géologique, c'est plutôt le calme plat depuis quelques centaines de millions d'années.



Volcan de Vénus pris par la sonde Magellan

La périodicité des passages de Vénus devant le Soleil

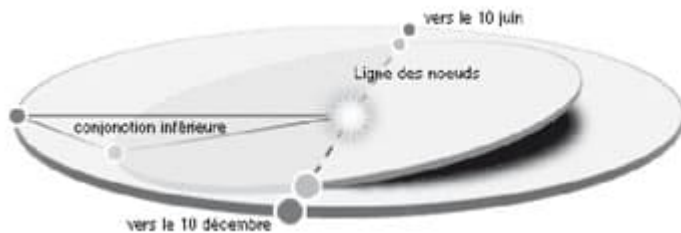
Les passages de Vénus devant le disque du Soleil, appelés aussi *transits*, sont des phénomènes rares (voir [cahier 1, figure 15](#)). Aucun transit n'a eu lieu au cours du XX^e siècle. Les deux derniers ont eu lieu les 9 décembre 1874 et le 6 décembre 1882.

L'explication est simple. Dans sa course, Vénus se retrouve tantôt entre la Terre et le Soleil (conjonction inférieure), tantôt à l'opposé du Soleil (conjonction supérieure).

Si le plan de l'orbite de Vénus était le même que le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil, il se produirait un transit à chaque conjonction inférieure de Vénus.

Mais, du fait de l'inclinaison de son orbite de $3^{\circ}23'$ par rapport à l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre autour du Soleil), le passage de Vénus devant le Soleil ne peut avoir lieu que si les trois astres sont alignés, et à condition que Vénus passe au point d'intersection de son plan orbital avec l'orbite de la Terre ([la ligne des nœuds, voir figure](#)).

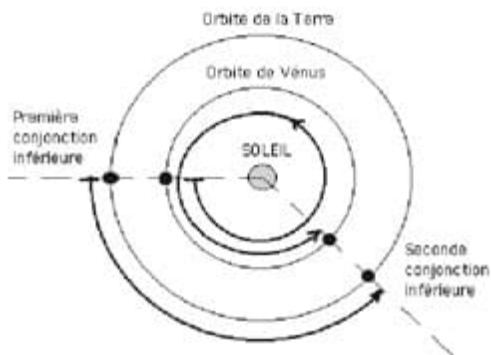
Les transits de Vénus ont donc lieu début juin, lors du passage au nœud descendant de son orbite, ou début décembre, lorsque la planète passe par le nœud ascendant.



Ligne des nœuds et conjonctions de Vénus.

De même que pour les éclipses de Soleil, on peut mettre en évidence, par l'étude des dates de transit, une périodicité : 8 ans, 121 ans et 6 mois, puis 8 ans, 105 ans et 6 mois, et ainsi de suite. Les transits ont donc lieu par paires séparées par un intervalle de plus d'un siècle. L'explication tient au fait que 13 révolutions de Vénus, soit 2 921 jours, correspondent environ à 8 révolutions de la Terre autour du Soleil, soit 2 922 jours. Les circonstances du transit étant réunies à une date donnée, il est fort probable qu'elles soient réunies de nouveau 8 ans plus tard. Mais ce n'est qu'au bout d'une période de 243 ans que les phénomènes se reproduisent quasiment à l'identique.

Le prochain passage de Vénus devant le disque du Soleil se déroulera le 8 juin 2004. Le transit commencera à 5 h 20 du matin et se terminera à 11 h 23 (temps universel ; ajouter 2 heures pour avoir l'heure française d'été). Il s'agit donc un événement exceptionnel à ne pas rater³. Il faudra ensuite patienter jusqu'au 6 juin 2012 pour voir le suivant. La table ci-dessous donne les dates des transits de Vénus jusqu'en 2255 ainsi que la durée du phénomène.



Orbite de Vénus.

Date	Durée maximale du phénomène
8 juin 2004	6 h 26
6 juin 2012	6 h 52
10 décembre 2117	5 h 56
8 décembre 2125	5 h 50
11 juin 2247	5 h 58

L'événement du 8 juin 2004

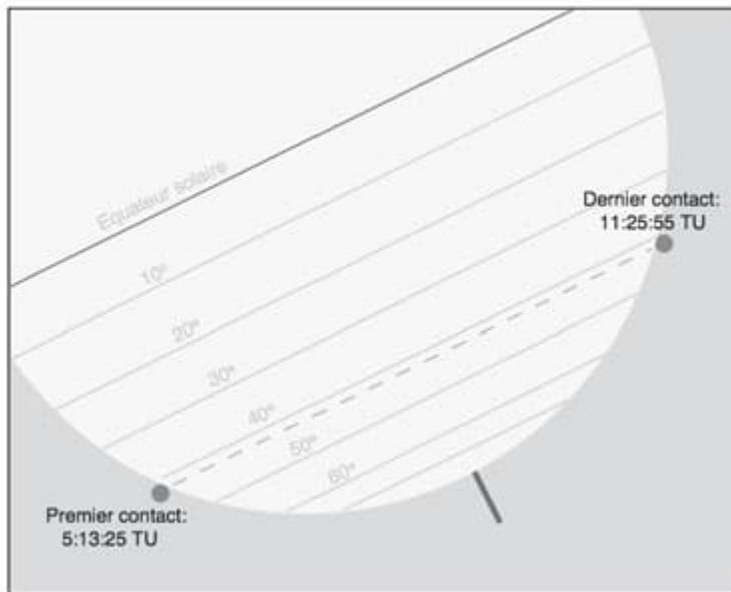
À l'occasion du prochain transit de Vénus, l'Observatoire européen austral ESO, en partenariat avec l'Association européenne pour l'éducation en astronomie EAAE, lance un vaste programme éducatif public qui permettra à toutes les personnes intéressées de participer activement à l'événement astronomique. En effectuant une observation relativement simple, toute personne suivant à la lettre les instructions données sur le site Web de l'ESO pourra contribuer à la mesure de l'une des distances astronomiques les plus fondamentales, c'est-à-dire la distance moyenne Terre-Soleil.

En effet, l'échelle entière des distances cosmiques, depuis notre voisinage du système solaire jusqu'aux galaxies les plus lointaines de l'Univers, repose sur cet étalon fondamental, appelé unité astronomique (UA).

Le transit du 8 juin 2004 est donc une occasion unique de participer à une expérience scientifique d'intérêt historique. Bien entendu, la réponse correcte est déjà connue : depuis 1960, les mesures de distance effectuées par radar, ainsi que l'envoi de sondes spatiales, ont permis de connaître les distances dans notre système solaire avec une grande précision. En 1976, l'Union astronomique internationale a défini l'unité astronomique comme valant 149 597 870 kilomètres.

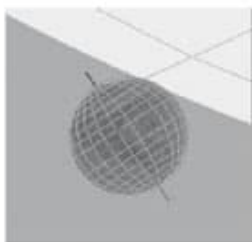
Pour les observations de juin 2004, la question intéressante sera de savoir quel degré de précision pourra être obtenu avec la méthode purement géométrique⁴, celle qui a historiquement permis d'établir pour la première fois la distance Terre-Soleil lors des transits de 1761 et 1769.

Notons qu'avec un diamètre apparent de 57,8 secondes d'arc, Vénus pourra aussi être vue à l'œil nu, à condition de se protéger les yeux avec des « lunettes éclipses ».

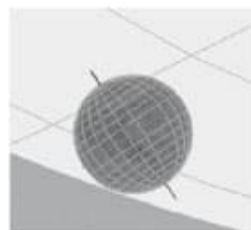


Transit du 8 juin 2004.

Les quatre diagrammes qui suivent montrent en détail chacun des contacts entre Vénus et le disque du Soleil lors du transit de 2004.



**5 h 19 min 57 s TU.
Contact d'entrée extérieur.**



**5 h 39 min 39 s TU.
Contact d'entrée intérieur.**

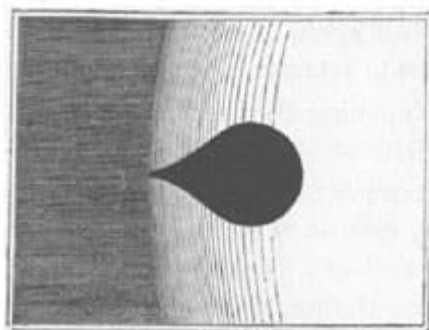


11 h 04 min 06 s TU.
Contact de sortie intérieur.



11 h 23 min 15 s TU.
Contact de sortie extérieur.

Au télescope, un intéressant phénomène pourra également être étudié : celui de la « goutte noire ». Ce phénomène est observable lors de la phase initiale ou terminale d'un passage de Mercure ou de Vénus devant le Soleil, c'est-à-dire lors des contacts : le petit disque sombre de la planète, déjà entièrement visible sur le disque solaire, prend la forme d'une goutte de liquide, de sorte que la planète semble se détacher du bord du Soleil avec un léger retard. Nombre d'astronomes ont cru que le phénomène était produit par la réfraction de la lumière solaire dans l'atmosphère de la planète. Or Mercure n'a pas d'atmosphère. C'est Jérôme Lefrançois de Lalande qui en donna l'explication correcte en 1770, en termes de ce qu'il a appelé l'« irradiation » : l'atmosphère terrestre et la diffraction dans le télescope lui-même sont responsables de l'étalement de l'image en forme de goutte.



Phénomène de la goutte noire.

L'image apparente de Vénus est légèrement déformée juste aux moments où celle-ci est en contact avec le bord du disque solaire. L'astronome anglais John Bevis en fit les premiers dessins précis en 1769.

Lors des observations historiques de 1761 et 1769, le phénomène a occasionné des difficultés imprévues dans la détermination exacte des instants d'entrée et de sortie de la planète devant le disque du

Soleil, comme le rapporte notamment Chappe d'Auteroche lors de son expédition en Russie de 1761. Le phénomène peut être décrit de la façon suivante⁵ :

« Chappe revint sans perdre de temps à sa propre observation. Les conditions étaient parfaites : pas le moindre brouillard, le soleil s'était levé sur un horizon net. La lunette de Chappe, qu'il avait tant dorlotée durant les six mois précédant le transit, était la meilleure qui pût se trouver. Pour avoir un enregistrement plus sûr, il avait décidé d'utiliser la technique de la projection, plutôt que l'observation directe à travers un filtre protecteur. Il fixa à l'arrière de l'oculaire une feuille de papier graduée qu'il avait soigneusement préparée, de telle façon que l'image du soleil emplissait un cercle de 6 pouces. Il avait divisé le diamètre horizontal du cercle en 30 parties égales, et c'est en suivant ce quadrillage qu'il pourrait enregistrer ses données avec la plus grande précision. Un fil à plomb était suspendu de façon à ce qu'il jette une ombre verticale sur le centre de l'image de Soleil, afin d'aider à la mesure.

Le point clé de l'observation était le chronométrage des instants de contacts : le moment où Vénus mordrait pour la première fois le disque du Soleil, puis, cinq ou six heures plus tard, celui où elle le quitterait. Soudain, la tache de Vénus parut. Chappe vit distinctement comme une atmosphère ou une ombre obscure autour du corps de la planète, qui perturba l'appréciation exacte du premier contact. À cet instant précis, la tache noire de la planète sembla rester connectée comme une gouttelette à la frontière du limbe solaire, jusqu'à ce que soudain la connexion fût cassée et que la planète fût vue bien après la bordure. L'astronome jura intérieurement. Ils n'avaient pas prévu cet effet, et il faudrait plus tard faire des corrections, en tenant compte de l'écart moyen mesuré par divers observateurs. Chappe fut ensuite étonné de voir combien la tache enfin nette de Vénus était petite : un minuscule cercle noir maculait la face radieuse du Soleil, et le traversait majestueusement, sans se presser. La caresse dura cinq heures trente-sept minutes. Le dernier contact de Vénus avec le bord du Soleil fut aussi difficile à mesurer que le premier. Plus de dix secondes avant, la tache redevint gouttelette, irrésistiblement allongée en direction du bord solaire. Plus elle disparut brusquement. »

Les projets d'observations du prochain transit de Vénus s'adressent particulièrement aux enseignants et aux scolaires, et sont donc d'un immense intérêt pédagogique.

La meilleure conclusion vient de la plume de Jérôme Lalande⁶, l'un des principaux protagonistes des observations du transit de Vénus en 1769 :

« C'est en 1772 que je publiai mon fameux *Mémoire sur le passage de Vénus*, rapportant les diverses observations effectuées lors du transit du 3 juin 1769. Je le conclus par le résultat tant attendu : la valeur de la parallaxe solaire. Nous avions quelque peu peiné pour réduire les données disparates qui nous étaient parvenues du monde entier. Les observations avaient été rendues incertaines par l'agitation des images et par les fausses apparences dues à la diffraction de la lumière par les instruments. Nous nous étions néanmoins attachés à calculer une juste moyenne, et nous pûmes annoncer avec assurance que trente-sept millions de lieues nous séparaient de Phébus, à un million de lieues près.

Certains de mes adversaires firent valoir que la précision du résultat ne justifiait pas tous les espoirs que l'on avait jadis placés dans le rendez-vous de Vénus. Ils n'avaient pas tout à fait tort, sur le plan de la pure science : je ne doute point que les astronomes des temps futurs affineront nos méthodes, ou même trouveront des moyens plus ingénieux pour mesurer l'Univers avec la plus parfaite précision. Mais quoi, ces froids contradicteurs oublièrent-ils qu'au-delà même du calcul de la parallaxe du soleil et des planètes, le rendez-vous de Vénus avait été un sommet dans l'histoire de la science ? Pour la première fois, depuis les débuts de l'humanité, au même instant, disséminés partout dans le monde, des savants de toutes nations avaient observé de concert le même phénomène céleste et s'étaient communiqués les résultats de leur travail. Quelle leçon de paix et de concorde nous avons donnée aux Grands de la Terre ! Le génie, par ses bienfaits, est cosmopolite. Ses découvertes sont l'héritage du genre humain, et les travaux des hommes occupés à défricher les routes de la science, à prendre la nature sur le fait, préparent en silence le destin des nations.

J'ai calculé que Vénus recroiserait le Soleil le 8 décembre 1874 et le 6 décembre 1882. Et à nouveau le 8 juin 2004, puis le 6 juin 2012. Ces temps paraissent lointains. Mais que sont-ils au regard du chaos des âges que seule l'Astronomie a su débrouiller ? »

1- Version complète d'un texte partiellement publié en 2003 dans l'ouvrage collectif *Vénus devant le Soleil*, Paris, Vuibert/Adapt.

2- Encore que certains exobiologistes n'excluent pas la possibilité d'une vie microbienne dans l'atmosphère supérieure de Vénus.

3- De fait, le 8 juin 2004 le temps a été superbe dans toute la France et les conditions de visibilité ont été idéales [Note ajoutée pour la présente édition].

4- Des milliers d'observations venues du monde entier et centralisées par l'Institut de mécanique céleste de l'Observatoire de Paris ont permis de faire une mesure scientifique plus précise que lors de tous les passages précédents. Le résultat obtenu pour la distance Terre-Soleil a été de 149 608 708 kilomètres +/- 11 835 kilomètres, soit un écart d'à peine 10 838 kilomètres par rapport à la valeur officielle [Note ajoutée pour la présente édition].

5- Extrait de J.-P. Luminet, *Le Rendez-vous de Vénus* (JC Lattès, 1999 ; Livre de Poche, 2001).

6- Adapté par J.-P. Luminet dans le roman déjà cité.

De Mars à la Terre, vérités sur la Planète rouge¹

Dans l'après-midi du 3 octobre 1962, alors qu'il travaille dans son champ de maïs, un paysan nigérien entend une violente explosion, puis subit de plein fouet une onde de choc qui le cloue au sol. Trois secondes plus tard, dans un fracas d'apocalypse, un bolide s'écrase à dix mètres de lui. Craignant qu'il ne s'agisse d'un fragment d'obus, notre héros hésite d'abord à s'approcher du lieu de l'impact. Quand il se risque enfin à jeter un coup d'œil, il découvre dans son champ un cratère de soixante centimètres de profondeur, au fond duquel repose une pierre noire. Chue du ciel, la météorite est baptisée Zagami. On dirait le nom d'un dieu, mais c'est celui d'un lieu, celui où la pierre a échoué, tout simplement.

Pesant initialement 18 kilogrammes, Zagami venait de Mars. Dans sa course obstinée autour du Soleil, la planète Mars peut en effet perdre de petits morceaux en route. Son atmosphère ténue ne la protège guère des comètes et autres astéroïdes vagabonds, ni des chocs cosmiques formidables que ceux-ci occasionnent. Les impacts labourent la surface et confèrent suffisamment d'énergie à des roches pour qu'elles échappent à l'attraction martienne, même si elles sont logées à plusieurs kilomètres de profondeur. Les débris errent au hasard durant des millions d'années, ballottés par les vagues de gravité imprimées par Jupiter. De temps à autre, l'un d'eux passe si près de la Terre qu'il est capturé par la gravité de notre planète. Plongeant dans l'atmosphère, une roche martienne vient terminer son périple chez nous. Un tel échouage n'est pas fréquent. Trouver un bout de Mars sur Terre est un événement.

La vie est-elle un phénomène unique ?

Le 7 novembre 1996, soit trente-quatre ans après son arrivée sur Terre, un petit fragment de Zagami est reparti vers Mars, attaché au spectromètre de la sonde Mars Global Surveyor. Par ce geste symbolique, Zagami est devenue la première météorite renvoyée par la main de l'homme sur son monde d'origine.

Un monde qui évolue à 227 millions de kilomètres du Soleil en moyenne (contre 150 millions pour la Terre), dans une région où la proximité relative de notre étoile permet encore de le réchauffer. Sa température de surface peut atteindre au mieux 20 °C, au pire – 140 °C. Inclinée sur son orbite, Mars connaît des saisons régulières mais plus longues et plus marquées que les nôtres. La faible atmosphère qui l'entoure permet de distinguer la couleur de son sol, à laquelle elle doit son nom de Planète rouge. Mars est presque deux fois plus petite que la Terre. Cette taille modeste a joué un rôle capital dans son histoire avec la vie.

La vie ! Voilà resurgir la grande énigme, vieille de vingt-cinq siècles : existe-t-elle ailleurs que sur notre planète Terre, ou bien sommes-nous désespérément seuls dans l'Univers ? Comment répondre ? Tenter de recevoir des messages radio de lointaines et hypothétiques civilisations avancées ? Détecter, parmi les nouveaux systèmes planétaires découverts dans la galaxie, une petite planète bleue semblable à la Terre ? Plus simplement, il suffirait de dénicher dans notre système solaire un seul témoignage de vie fossile, une simple bactérie, qui nous permettrait de conclure que la vie n'est pas un phénomène unique lié à la Terre, mais un processus universel. Mars, si proche de nous, est la cible idéale pour cette quête de « l'autre ».

Les petits hommes verts de la Planète rouge

Au début du XX^e siècle, Mars était perçue par beaucoup comme une véritable « Terre lointaine » et l'on ne doutait pas que la vie y ait vu le jour. L'observation de grandes lignes sombres à sa surface était interprétée par d'immenses réseaux de canaux artificiels bâtis par d'ingénieux ingénieurs. L'astronome américain Percival Lowell faisait construire un observatoire dédié à la Planète rouge et publiait plusieurs ouvrages décrivant Mars comme une Terre avancée, tandis qu'en France, Camille Flammarion imaginait l'existence d'une espèce martienne analogue à la nôtre. La science-fiction s'est emparée de la Planète rouge, et la littérature martienne s'est épanouie sans souci de crédibilité. Ainsi a pris naissance le mythe martien des « petits hommes verts sur une planète rouge », qui a alimenté l'imaginaire du public pendant de longues années.

En 1965, les premières images transmises par la sonde Mariner 4, révélant des paysages de type lunaire, criblés de cratères et totalement désertiques, ont ruiné brutalement toute hypothèse de la présence de vie, même végétale, à la surface de Mars. Pourtant, l'espoir d'une vie passée a resurgi de l'étonnante diversité des paysages martiens dévoilés depuis par les nombreuses sondes qui ont pris le chemin de la

Planète rouge. Autant de témoignages d'une activité géologique importante et d'un environnement différent dans le passé, où les similitudes avec la Terre ne manquent pas. Mars, comme la Terre, a connu de forts bombardements météoritiques dans sa jeunesse, puis des périodes d'intense activité volcanique. L'érosion a affecté la surface et modifié ses paysages au cours du temps. La glace a modelé son sol. Les structures en pétales qui entourent certains cratères d'impacts météoritiques montrent que la glace est aussi présente dans le sous-sol : fondue sous la violence des impacts et mêlée aux roches éjectées, elle a formé des écoulements boueux en forme de lobes fleuris. Des chenaux d'écoulements larges de plusieurs dizaines de kilomètres abondent, présentant des murs courbés, des îles en forme de larme. De toute évidence, l'eau a coulé sur la Planète rouge de façon durable. Elle a raviné, érodant lentement la surface.

Remontons le temps. Voici 4,5 milliards d'années, Mars achève sa formation. En se refroidissant, elle connaît un dégazage important qui forme une épaisse atmosphère riche en azote et en gaz carbonique, créant les conditions de température et de pression favorables à la présence d'eau liquide. Parallèlement, elle subit d'intenses bombardements météoritiques qui se poursuivent jusqu'à 3,8 milliards d'années, criblant le sol de cratères d'impacts. L'eau s'écoule en surface entre 4 et 3,5 milliards d'années. C'est précisément l'époque où, sur Terre, les premières bactéries apparaissent. À partir de là, sur Mars, la dissipation progressive de l'atmosphère, pour une part échappée dans l'espace et pour l'autre part piégée dans le sol, entraîne une baisse de la température et la disparition de l'eau en surface, ainsi que la formation de glace dans le sous-sol. Des poches d'eau liquide, piégées en profondeur, ont subsisté.

Si la Terre et Mars ont connu des environnements semblables dans leur jeunesse, Mars, beaucoup moins massive que la Terre, a ainsi évolué plus rapidement, dissipant vite sa chaleur interne. Tandis que la Terre modifiait son atmosphère pour l'enrichir en oxygène grâce à la vie microbienne, Mars, trop petite, n'a pu retenir son atmosphère et s'est refroidie inexorablement. La poursuite de son activité volcanique a donné naissance à un immense réseau de canyons. Entre 2,5 milliards et 1 milliard d'années se forment les grands volcans, dont le géant Olympus Mons, qui culmine à 25 000 mètres. Ce sont les derniers signes d'une activité volcanique, qui se serait achevée définitivement il y a quelques centaines de millions d'années, laissant un sol figé sous une fine atmosphère.

Dans ces conditions extrêmes, la vie, si jamais elle est apparue sur Mars, n'a probablement pas pu se maintenir. C'est néanmoins le témoignage d'une possible vie passée que les sondes spatiales actuelles cherchent en se posant à la surface de la Planète rouge. Depuis 1998

et pour plus de dix ans, profitant des fenêtres de tir favorables tous les deux ans, ces sondes envoient orbiteurs, pénétrateurs et atterrisseurs pour percer les secrets de la Planète rouge. Si Mars est aujourd'hui un monde mort, ses paysages nous racontent les étapes successives de sa formation. Autant d'empreintes de son passé qui sont restées intactes. Autant de pages du livre de la genèse des planètes telluriques qui nous dévoilent la naissance, la vie et la mort d'une planète de type terrestre. Comme si Mars était une Terre en miniature, dont le chronomètre géologique aurait simplement tourné plus vite.

Quant à son chronomètre biologique, bien des hypothèses restent permises. Toutes les recherches récentes dans les sciences du vivant corroborent une tendance générale : sur notre planète Terre, on découvre des petites bêtes absolument partout. En 1979, lorsque le sous-marin *Alvin 3* a exploré la dorsale du Pacifique oriental, à 2 600 mètres de profondeur, il a découvert l'existence d'une multitude de micro-organismes, ainsi que des vers géants, des crustacés et des poissons. Tout ce beau monde s'ébat à une profondeur où la pression hydrostatique est deux cent cinquante fois supérieure à celle de la surface et où la température de l'eau peut monter à 350 °C. En novembre 1999, aux États-Unis, au cœur d'une centrale nucléaire, on a découvert une bactérie rose, la *Deinococcus radiodurans*, capable de survivre dans un environnement radioactif émettant trois mille fois la dose mortelle pour un être humain. En juillet 2000, un microbiologiste a découvert dans les glaces du pôle Sud des bactéries qui, loin d'hiberner, croissent et se multiplient à des températures de - 17 °C. Cette bactérie, d'une espèce inconnue, est proche de la famille des *Deinococcus*. C'est dans cette famille que l'on trouve les bactéries les plus résistantes, grâce notamment à leur capacité à réparer leur ARN de manière très efficace. En août 2000, une biologiste a découvert que des bactéries, encore inconnues, vivent et se multiplient dans les nuages.

On a baptisé « extrémophiles » ces bactéries terrestres qui sont capables de survivre dans des milieux hostiles, tels les sols perpétuellement gelés, les vallées sèches de l'Antarctique à la température de - 30 °C (un climat semblable à celui de la planète Mars) et, à l'autre extrémité de l'échelle, les eaux acides et bouillantes des geysers, les sources hydrothermales océaniques à plus de 100 °C et 2 500 mètres de profondeur. En 2002, le CNRS a lancé un programme de géomicrobiologie en environnements extrêmes. Physiciens, biologistes et géologues collaborent, avec pour mission d'explorer les limites physico-chimiques du vivant dans des milieux réputés hostiles.

Les extrémophiles rendent plausible la vie extraterrestre dans un éventail d'environnements bien plus large que ce que l'on pensait : non seulement les glaces polaires de Mars, mais aussi les couches

profondes et glacées d'Europe, Callisto et Ganymède, satellites de Jupiter, ou Titan, satellite de Saturne. Autant de nouvelles scènes qui s'ouvrent pour le grand spectacle du vivant.

1- Article paru en février 2004 dans la revue *Aujourd'hui Poème* (n° 48).

Les risques d'impact avec la Terre : réalité ou fiction¹ ?

La Terre se promène dans un vaste stand de tir cosmique. Des millions de projectiles potentiels, vestiges du système solaire naissant, sillonnent l'espace à grande vitesse. La plupart, bénins, sont des grains de la taille d'une poussière ; d'autres, les astéroïdes, sont des cailloux rocheux ou métalliques de la grosseur d'une montagne ; d'autres encore, les comètes, sont des boules de glaces amalgamées de roches et de poussières.

Le terme NEO (Near-Earth Objects) désigne les petits corps du système solaire dont l'orbite s'approche de celle de la Terre. La plupart sont des astéroïdes présentant un danger de collision potentiel. On en connaît plus de mille à ce jour, mais plusieurs dizaines de milliers seront encore répertoriés au XXI^e siècle.

Parmi les NEO il faut compter environ 500 comètes. Une douzaine se présentent chaque année de façon imprévisible dans le système solaire interne. L'estimation du danger potentiel d'une collision avec ces comètes inopinées est un exercice très délicat, à cause de leur nombre très élevé, du fait qu'elles peuvent surgir n'importe où et n'importe quand, et parce que le plus souvent elles ne deviennent visibles que lorsqu'elles sont déjà proches de nous. De plus, elles se déplacent près de deux fois plus vite que les astéroïdes.

Au cours du dernier millénaire, cinq comètes sont passées à moins de 600 000 kilomètres de la Terre. Le plus proche passage est celui de la comète Lexell, à 223 500 kilomètres, en juillet 1770.

Puisque comètes et astéroïdes peuvent entrer en collision avec la Terre, la communauté scientifique a évalué les fréquences moyennes d'impact, fondées sur le nombre supposé de NEO, ainsi que sur les cratères terrestres que leurs impacts passés ont laissés.

Les impacteurs de 50 mètres, capables de provoquer des événements du type Tunguska ou Meteor Crater, surviennent avec une fréquence moyenne d'un par siècle.

Tous les 300 000 ans environ, la Terre subit une collision avec un corps de taille kilométrique. À une vitesse typique de 25 kilomètres par seconde, l'énergie dégagée serait supérieure à l'arsenal nucléaire

mondial. Un tel impact projetterait tellement de poussières et de cendres dans la stratosphère qu'en masquant la lumière du Soleil, il ferait disparaître plusieurs saisons d'affilée, provoquant épidémies et famine.

La fréquence moyenne d'impact avec un astéroïde ou une comète de 10 kilomètres est de l'ordre de un tous les 100 millions d'années. Il s'agit de la taille critique à partir de laquelle le volume de poussières injectées dans l'atmosphère est capable de plonger la planète dans un long hiver astéroïdal et de provoquer une extinction massive. Il y a effectivement une correspondance étroite entre les extinctions massives d'espèces et les chutes de météorites géantes. Au moins la dernière en date, la disparition des dinosaures et de nombreuses autres espèces il y a 65 millions d'années, est liée aux effets globaux engendrés par la chute d'un bolide de 10 kilomètres de diamètre, dont on a retrouvé le cratère d'impact dans le golfe du Mexique.

Les risques de collision entre des « vagabonds célestes » et la Terre ne sont donc pas seulement une fiction source d'inspiration cinématographique, mais une réalité. Pour l'affronter, les spécialistes se doivent d'envisager sérieusement les parades possibles, qui ne sont pas nécessairement celles que nous avons vues à l'écran !

SOS météorites¹

Dans l'album de Hergé *On a marché sur la Lune*, tandis que Tintin et ses compères sont à bord de la fusée qui va les conduire sur la Lune, le professeur Tournesol découvre à travers le hublot un énorme rocher qui s'interpose. Il s'exclame : « Mais je ne rêve pas ! Mais oui, ma parole, c'est Adonis ! » Eh bien non, il ne rêve pas, Tournesol. Et l'inénarrable Dupont, à ses côtés, profère une nouvelle ânerie : « Qui est-ce, Adonis ?... Un de vos amis qui habite la région ? »

Car l'ami en question ferait plutôt figure de vagabond céleste, aux errances assez dangereuses pour transformer le rêve de Tournesol en cauchemar. Au cours de ses pérégrinations dans le système solaire, Adonis, astéroïde numéro 2101, a en effet tendance à s'approcher fâcheusement de notre bonne vieille Terre. Au risque même de lui donner une grosse claque. Faisons un peu la lumière sur cette affaire.

Corps rocheux de tailles diverses, les astéroïdes gravitent pour la plupart en sage troupeau, coincés entre les orbites de Mars et de Jupiter. Dans cette zone, ces avortons d'une planète qui n'a jamais réussi à se former tournent autour du Soleil comme les fils entrelacés d'une immense pelote. Et ils sont nombreux ! Grâce à des caméras automatiques montées sur télescopes, plusieurs dizaines de milliers sont découverts chaque année.

Pourquoi ce nom, 2101 Adonis ? Parce que si vous découvrez un astéroïde, l'Union astronomique internationale (UAI) lui attribue d'abord un numéro matricule, et ensuite, vous pouvez recommander le nom de votre choix, à l'exception du vôtre. Les premiers astéroïdes découverts au XIX^e siècle ont été baptisés du nom des dieux et déesses de l'Antiquité grecque et romaine. Quand ce panthéon a été épuisé, il a fallu trouver autre chose. Aujourd'hui, l'UAI retient le principe que le découvreur peut choisir n'importe quel nom, à partir du moment où il n'est pas obscène. Voir son propre nom attribué à un astéroïde est comme une montée au ciel qui, pour une fois, se passe du vivant de l' élu. C'est ainsi que « mon » astéroïde, 5523 Luminet, gravite à un peu plus de quatre cents millions de kilomètres du Soleil. Comme sa taille atteint à peine les douze kilomètres, son éclat n'est que celui d'une bougie allumée à 2 500 kilomètres de distance. Bien piètre

luminaire !

Revenons à Adonis. En quoi est-il potentiellement dangereux ? Eh bien, parce qu'une certaine fronde gravitationnelle éjecte de temps à autre des astéroïdes de leur troupeau, et les propulse en direction de la Terre. On considère qu'ils présentent un danger de collision potentiel avec la Terre si leur trajectoire s'approche à moins de sept millions de kilomètres de nous et si leur diamètre dépasse cent trente mètres. Il existe plusieurs milliers de ces « géocroiseurs ». Adonis en fait partie. L'un des plus surveillés se nomme Toutatis (dieu de la guerre chez les Gaulois qui, comme chacun sait, craignaient que le ciel ne leur tombe sur la tête). Il doit « frôler » la Terre le 29 septembre 2004 à 1 556 000 kilomètres de distance. La marge semble confortable, mais elle inquiète les astronomes : les vagabonds célestes ont des orbites très chaotiques, et la moindre perturbation peut les précipiter sur notre planète.

Des millions de projectiles sillonnent l'espace. La plupart sont des grains de la taille d'une poussière ou d'une pierre : les météorites. Il en tombe en moyenne mille tonnes par jour. D'autres, les astéroïdes, sont des cailloux de la grosseur d'une montagne.

Apprécions la bonne connaissance qu'Hergé avait de l'astronomie de son temps. Son album *On a marché sur la Lune* date de 1954. Or l'astéroïde 2101 Adonis avait été découvert en 1936. D'un diamètre de deux kilomètres, il s'est approché à moins de deux millions de kilomètres de notre planète en 1937. Il n'est cependant pas passé entre la Terre et la Lune, comme l'a imaginé Hergé pour épicer le voyage de ses héros. Malgré tout, le dessinateur avait bien conscience du grand nombre de corps célestes qui errent dans les parages de la Terre : un peu plus loin dans l'album, la fusée de nos héros est frôlée par une météorite, certes plus petite que l'astéroïde Adonis, mais suffisamment grosse pour pulvériser l'engin en cas de collision. Les futurs voyageurs vers la planète Mars, dans la seconde moitié du XXI^e siècle, auront précisément à faire face à ce type de danger.

Du temps d'Hergé, nous connaissions très peu de géocroiseurs. Aujourd'hui, nous pensons avoir repéré tous ceux de taille supérieure à dix kilomètres, mais à peine quelques milliardièmes de ceux dont la taille est inférieure à un kilomètre. Sans tomber dans un catastrophisme de mauvais aloi, on peut raisonnablement se demander si notre civilisation est menacée dans un avenir proche par un « impacteur » cosmique. La réponse est malheureusement oui. Bien qu'à tout instant la probabilité de collision soit très faible, la Terre finira tôt ou tard par être frappée par un bolide céleste.

Les impacteurs de 50 mètres, capables de provoquer des explosions équivalant à mille bombes d'Hiroshima, surviennent à un rythme moyen d'un ou deux par siècle. La Terre a récemment connu

deux tels impacts dans des zones inhabitées : en 1908 en Sibérie, et en 1997 au Groenland.

L'impact d'un corps céleste de plus de cinq cents mètres de diamètre, n'importe où sur la planète, serait suffisant pour menacer sérieusement notre civilisation. La probabilité qu'une telle collision se produise est d'environ un sur cent mille par an. Ce risque semble faible, mais les risques de mourir dans un accident d'avion sont également d'environ un sur cent mille par an. Vous avez donc autant de chances de mourir dans un accident d'avion (où peu de gens meurent, mais souvent) que dans une catastrophe cosmique (où tout le monde meurt d'un coup, mais très rarement) !

Quant à la fréquence moyenne d'impact avec un astéroïde de 10 kilomètres, elle est de un tous les cent millions d'années. Il s'agit de la taille critique à partir de laquelle le volume de poussières injectées dans l'atmosphère terrestre est capable de plonger la planète dans un long hiver astéroïdal et de provoquer des extinctions massives. La Terre en a connu cinq au cours des six cents derniers millions d'années. La plus récente et la plus médiatisée est la disparition des dinosaures, survenue il y a 65 millions d'années (incidemment, elle a permis aux mammifères que nous sommes de se développer).

Les scientifiques se sont penchés sur la meilleure manière de se débarrasser d'un rocher de l'espace. On ne peut pas toujours compter sur Bruce Willis pour sauver la Terre. Dans le film *Armageddon*, l'acteur américain incarne un spécialiste des forages qui a pour mission de placer au cœur d'un astéroïde menaçant une charge nucléaire pour le détruire. Le scénario est notoirement idiot, car l'astéroïde se fragmenterait en morceaux qui frapperaient la Terre en plusieurs points au lieu d'un seul. Qui plus est, les débris seraient radioactifs...

Nombre de chercheurs estiment que la meilleure méthode consiste à dévier l'astéroïde de sa course. L'idée la plus élégante consiste à le saupoudrer de talc blanc ou de poussière noire afin de modifier ses propriétés de réflexion. Les rayons solaires exerceraient alors sur lui une pression différente, suffisante pour le pousser hors de son chemin mortel. Mais la technique nécessiterait un siècle de travail. Délai bien suffisant pour certains astéroïdes à l'orbite calculée longtemps à l'avance, mais trop court pour maints bolides dont les trajectoires chaotiques sont impossibles à prévoir.

La promesse du caillou¹

Aux yeux du néophyte, les météorites ressemblent à d'ennuyeux cailloux. Pourtant, à part les quelques kilos de pierres rapportées par les missions sur la Lune, ce sont les seules roches qui ne soient pas terrestres. La plupart sont des petits bouts d'astéroïdes qui, entre Mars et Jupiter, se heurtent entre eux. D'autres viennent de la nébuleuse présolaire. Quelques-unes se détachent des comètes. Un petit nombre enfin – les plus chères aux yeux du commerçant – vient de la Lune et de Mars. Au total, ce sont des fragments de tout le système solaire qui nous tombent sur la tête.

Sondées au microscope, les météorites nous apportent un témoignage direct sur l'enfance de notre monde. Leur rôle est bien plus capital encore. Peut-être ont-elles ensemencé la Terre primitive en molécules organiques. Sans doute sont-elles à l'origine de la disparition massive d'espèces survenue voici 65 millions d'années. Certainement représentent-elles une menace sérieuse pour notre avenir.

Pierres jaspées à nos mains découvreuses, certaines météorites pierreuses sont des « chondrites » : elles contiennent de petites sphères de silicates qui ont été portées à haute température, les chondres – globules d'environ 1 millimètre de diamètre. Les chondrites ordinaires contiennent de petits grains de fer et de nickel broyés dans une matrice de silice et de chondres. Les chondrites *carbonées* renferment peu ou pas de métaux, mais leur haute teneur en carbone est le signe d'une altération chimique due à l'eau. Elles présentent une forte proportion d'éléments volatils et sont très oxydées, c'est-à-dire qu'elles contiennent des atomes d'oxygène qui se sont liés chimiquement à leurs propres molécules – l'oxygène adore se lier, c'est l'un des éléments les plus conviviaux de la création.

Les météorites les plus primitives sont celles qui présentent des chondres. Ces derniers se sont formés par fusion des grains de poussières de la nébuleuse solaire, fusion suivie d'un refroidissement brutal. Cet épisode se situe il y a 4,566 milliards d'années, lorsque le nuage de poussières et de gaz qui allait former le système solaire s'est effondré brusquement, dans une grande élévation de pression et de

température. Plus tard, la coagulation des grains refroidis a formé des grêlons, qui se sont de même amalgamés par collisions. Après 8 millions d'années sont apparus des embryons planétaires, capables de collecter davantage de matière par l'attraction due à leur masse, et 100 millions d'années plus tard, les planètes avaient atteint leur taille définitive.

Les chondrites, peu modifiées depuis leur formation, gardent la mémoire des conditions qui régnaient aux premiers instants de la formation du système solaire. En comparant la composition chimique des chondrites à celle du Soleil, on constate en effet que la répartition des éléments est identique, à l'exception des gaz volatils. Avec les chondrites, les chercheurs ont donc en main des échantillons de la nébuleuse qui a formé le Soleil et les planètes. Ils observent littéralement le placenta dont nous sommes nés.

Le 8 février 1969, peu après minuit, une lueur troue l'obscurité au-dessus de Pueblito de Allende, au nord du Mexique. Réveillés par une série de détonations, les villageois voient un objet brillant traverser le ciel et se briser en deux, chaque moitié éclatant encore et projetant de toutes parts des jets lumineux. Un énorme rocher vient d'exploser en plein ciel.

La météorite d'Allende, qui pesait une trentaine de tonnes, se pulvérise en des milliers de fragments tombant en pluie sur une surface de 450 km². La nouvelle de la chute se répand vite. En quelques jours, géologues, collectionneurs de météorites et chercheurs spécialisés accourent du monde entier pour récolter les débris extraterrestres.

Trois mille kilos sont recueillis. Ils sont très faciles à localiser. Beaucoup présentent ces couches dures, sombres et brillantes qui caractérisent les croûtes de fusion. Dessous, la pierre est grise, constituée d'innombrables grains minéraux, parsemée de chondres et d'inclusions blanches.

Allende ne peut pas mieux tomber pour les scientifiques. Non seulement elle appartient à la classe rare des chondrites carbonées, dont les constituants ont relativement peu changé depuis la création du système solaire, mais sa masse imposante fournit une généreuse quantité d'échantillons pour diverses analyses chimiques, isotopiques et microscopiques. Allende est aussi recueillie très rapidement après sa chute, et échappe donc aux contaminations terrestres et aux dégradations climatiques.

Après une étude exhaustive d'échantillons, les scientifiques trouvent dans certaines inclusions blanches des concentrations anormalement élevées de l'isotope magnésium 26, qui n'a pas la même origine que le reste de la météorite. Or le père du magnésium 26 est l'aluminium 26, un élément radioactif produit et éjecté dans

l'espace lors des explosions d'étoiles géantes, appelées supernovæ. Cela suggère que la source de l'aluminium 26 incrusté dans Allende est une supernova qui aurait explosé avant même la formation du système solaire. Plus fort encore : c'est l'onde de choc de cette explosion qui aurait déclenché la condensation de la nébuleuse gazeuse et la naissance du système solaire lui-même.

Allende est donc une roche antérieure à la formation du système solaire, qui se serait fait littéralement arroser par l'explosion fondatrice. Ensemencement cosmique ! Allende est un prodigieux livre minéral rédigé à la mairie de la Galaxie qui retrace l'acte de naissance de la Terre, des planètes et du Soleil. Reste à dater l'heureux événement. Le rapport isotopique uranium-plomb des inclusions blanches contenant le magnésium 26 donne précisément 4,566 milliards d'années : c'est l'âge du monde, de notre petit monde du moins (le grand monde, c'est-à-dire l'Univers, remonte à 14 milliards d'années).

Vertige du caillou... Imaginez-vous vraiment ce moment du passé où la Terre n'existe pas encore ? Pas même le Soleil ? Tout ce qui constituera notre système flotte à l'état latent, sous forme de nuage de gaz et de poussières. Et les atomes qui composent votre corps en ce moment, votre cerveau, l'essence même de vos pensées ? Ils sont disséminés, éparpillés dans cette grande soupe. Rien n'est engagé. Tout est possible. Mais Allende, ce caillou noir que vous pouvez triturer entre vos mains si vous en achetez un bout dans le commerce, Allende existe déjà. À ses yeux de corps présolaire, vous êtes aussi éphémère et anecdotique qu'un battement de cil dans une période de trois ans.

Macrocosme, microcosme. Le roman du carbone se lit d'une traite. La Terre se forme voici 4,5 milliards d'années. Dans l'eau tempérée de ses océans primordiaux tombe une énorme quantité de micrométéorites : cent mille fois la biomasse.

Leur analyse a révélé qu'elles sont riches en matière organique. La quantité de carbone apporté sur Terre par ce processus est énorme, largement de quoi démarrer la vie. Il n'est pas démontré que l'espace puisse apporter tout ce dont on a besoin, il faut peut-être quelques épices bien terrestres. Un bon potage ne se fait pas qu'avec des légumes du jardin. Mais il faut l'étincelle de départ.

Ainsi Héraclite l'avait-il compris : « L'homme est une étincelle stellaire. »

La légende des sciences

« On ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire. »

Auguste COMTE.

Trois mille ans de quête inassouvie¹

« Ceux qui, par la science, vont au plus haut du monde
Qui, par l'intelligence, scrutent le fond des cieux
Ceux-là, pareils aussi à la coupe du ciel
La tête renversée, vivent dans leur vertige. »

Omar KHAYYÂM,
Les Quatrains Rubâ'iyât.

Dans *Les Somnambules*, Arthur Koestler suggère que le processus de la découverte scientifique « rappelle l'exploit d'un somnambule plutôt que celui d'un cerveau électronique. [...] L'histoire des théories cosmologiques est une histoire d'obsessions collectives et de schizophrénies contrôlées ».

Quelle est donc cette histoire ?

La quête d'une rationalité de l'Univers commence avec les philosophes présocratiques, au VI^e siècle avant notre ère. Rompant avec les récits mythiques et les explications surnaturelles, ils font l'hypothèse d'un univers organisé, gouverné par des principes naturels qui peuvent être étudiés, compris et prédits. En particulier, les pythagoriciens émettent l'idée que l'Univers doit se manifester par des proportions régulières, des rythmes et des nombres.

Platon (427-347) est le premier à proposer une idéalisation du cosmos fondée sur la géométrie. Dans le *Timée*, véritable traité esthétique de cosmologie, il modélise le monde des astres par un emboîtement de sphères. La sphère est en effet la figure pure, parfaitement symétrique, et à ce titre la mieux appropriée pour représenter l'immuable et la perfection des cieux. Le monde d'ici-bas, soumis aux cycles de transformations naissance-corruption-mort, est décrit par les quatre éléments, chacun d'entre eux étant représenté par une figure moins symétrique que la sphère : un polyèdre régulier.

Un cinquième élément, l'éther ou quintessence, représenté par un dodécaèdre, n'acquiert droit de cité que chez Aristote, où il joue un rôle intermédiaire entre les physiques terrestre et céleste. Le système

du monde d'Aristote, présenté dans le *Traité du Ciel*, complète celui de Platon. Les orbes planétaires sont contenus à l'intérieur de la sphère des fixes, sur laquelle sont fichées les étoiles et les constellations. Le tout est couronné par le Premier Moteur, chargé de mettre en mouvement les cieux inférieurs.

Ce modèle cosmologique est davantage fondé sur des principes philosophiques que sur l'observation réelle du firmament. Une astronomie pratique se développe à Alexandrie, qui met la théorie à l'épreuve des faits. Aristarque de Samos (vers 310-230 av. J.-C.) calcule à partir des éclipses les dimensions du Soleil, de la Lune, et leur distance à la Terre. Il propose aussi que la Terre tourne autour du Soleil, mais son hypothèse, jugée impie, tombe dans l'oubli. Hipparque (vers 170-125 av. J.-C.) observe la Lune, le Soleil, les planètes, dresse le premier catalogue d'étoiles et découvre la précession des équinoxes. Ptolémée (v. 90-168 ap. J.-C.) marque le point culminant de la science grecque en réconciliant le système aristotélicien avec les données astronomiques accumulées depuis cinq siècles. Son *Almageste* explique les mouvements des astres par d'astucieuses compositions de cercles. Cette théorie des épicycles, transmise à l'Occident par les Arabes, régnera quinze siècles – une longévité sans équivalent dans l'histoire des sciences, qui s'explique précisément par la force d'un préjugé esthétique : celui de la circularité en tant qu'image de la perfection céleste.

En Occident, les acquis de la cosmologie grecque sont initialement remis en cause par la théologie chrétienne. Le moine Cosmas, au VI^e siècle, propose par exemple l'image d'une Terre plate et d'un cosmos-tabernacle où l'œcoumène est assujetti au visage du Christ ; la mystique allemande Hildegarde de Bingen décrit vers 1150 le cosmos comme une « formation géante ronde, imprécise, qui s'affine vers le haut comme un œuf ». Au XIII^e siècle, la cosmologie aristotélicienne et l'astronomie ptoléméenne pénètrent toutefois en Occident par le biais des traductions arabes et des commentaires d'Averroès. Une synthèse est dès lors recherchée entre pensées grecque et chrétienne, entre raison et foi. Ce sera principalement l'œuvre de saint Thomas d'Aquin. La cosmographie médiévale, mêlant le physique au spirituel, est magnifiquement transcrite dans *La Divine Comédie* de Dante. Le voyage initiatique du poète à travers les divers cercles du monde décrit une hiérarchie s'élevant de l'impur au parfait : au plus bas, l'élément terreux, le plus grossier de tous ; au plus haut, l'Empyrée, sphère ultime ceignant le monde, où trônent Dieu, les anges et les bienheureux.

La Renaissance scientifique débute avec Nicolas Copernic (1473-1543). L'originalité de son œuvre, *Des révolutions des orbes célestes*, s'exprime dans le postulat que le centre de l'Univers n'est pas

la Terre, mais le Soleil. Tous les corps célestes tournent donc autour de lui, et les mouvements apparents des astres ne sont que la conséquence du mouvement de la Terre : notre planète effectue une rotation complète sur elle-même en un jour et une révolution complète autour du Soleil en une année. Copernic n'abandonne pourtant pas le présupposé circulaire ; il conserve, et même complique le système d'épicycles ptoléméen. Il ne remet pas non plus en question la finitude du monde. Son œuvre, difficile et obscure, attendra plusieurs décennies pour diffuser dans les milieux cultivés.

Tycho Brahe (1546-1601) fait construire au Danemark le premier grand observatoire. Il relève à l'œil nu, avec une précision jusqu'alors inégalée, les positions des planètes et des étoiles. Il espère établir un système du monde intermédiaire entre ceux de Ptolémée et de Copernic, dans lequel la Terre conserverait sa position centrale par rapport à la sphère des étoiles fixes, la Lune et le Soleil tournant autour d'elle, mais les planètes tournant autour du Soleil, qui jouerait ainsi le rôle d'un deuxième centre. Il échoue. Son ancien assistant, le génial Johannes Kepler (1571-1630), confirme non seulement l'hypothèse copernicienne, mais il sape l'un des piliers de la doctrine aristotélicienne : la circularité. Huit ans de calcul acharné sur les données recueillies par Tycho Brahe le convainquent que les trajectoires planétaires sont des ellipses. Son *Astronomie Nouvelle* – titre de l'un de ses ouvrages fondamentaux, publié en 1609 – inaugure de fait une ère nouvelle, d'autant qu'en 1610, Galileo Galilei (1564-1642), effectuant les premières observations télescopiques, découvre les cratères de la Lune, les taches solaires et les satellites de Jupiter. Prenant à son tour parti pour l'hypothèse copernicienne contre Aristote et prétendant unir la physique des mondes terrestre et céleste, il doit abjurer devant l'Inquisition.

Un grand bouleversement de la pensée agite en effet les milieux intellectuels. Nombreux sont ceux qui estiment l'harmonie du monde antique perdue. Le cosmos aristotélo-chrétien considérait l'Univers comme fini, clos par une sphère ultime et surnaturelle. Dans cet univers à la mesure de l'homme, le chrétien trouvait satisfaction à un besoin viscéral de protection et à l'idée que le Paradis était physiquement accessible. Les esprits répugnaient également au concept d'espace infini. Les premières discussions sur l'infini spatial étaient cependant apparues très tôt chez les atomistes de l'Antiquité, comme Démocrite, Épicure et Lucrèce. Ils avaient conçu un espace vide et sans bornes, sillonné par des atomes indestructibles s'agglomérant par le jeu du hasard en configurations matérielles transitoires. Giordano Bruno (1548-1600), copernicien convaincu, reprend et développe les thèses atomistes dans des ouvrages provocateurs, postulant l'infinité de l'Univers et la pluralité des

mondes habités. Arrêté par l'Inquisition, il est brûlé vif à Rome.

Au XVII^e siècle, les physiciens cherchent à conférer à l'espace une structure matérielle. Dans le système de Descartes, la partie interne ressemble au système de Copernic, mais les choses changent au-delà : pour Descartes, le vide n'existe pas, l'espace est rempli d'une matière fluide universelle qui s'organise en tourbillons. Le ciel s'étend à l'infini, les étoiles sont autant de soleils qui servent de centres à autant de tourbillons, semblables ou différents du nôtre.

Ces nouvelles cosmologies, qui abandonnent progressivement le monde géocentrique clos des anciens au profit d'un univers décentré et infini, culminent avec l'œuvre d'Isaac Newton (1642-1727). Dans ses *Principes mathématiques de la Philosophie Naturelle*, publiés en 1687, Newton établit que tous les corps célestes interagissent selon une loi d'attraction universelle. Une pomme tombe parce qu'elle est attirée par la Terre vers son centre. De même, la Lune est attirée par la Terre, et toutes les planètes sont attirées par le Soleil, tournant autour de lui selon les ellipses devinées par Kepler.

Le système du monde newtonien se distingue radicalement des précédents. L'espace, mathématisé en termes de l'espace euclidien, est infini ; le temps est éternel ; la matière est mue par les lois universelles de la mécanique.

L'astronomie des XVIII^e et XIX^e siècles est dès lors entièrement soumise à la puissance prédictive de la théorie newtonienne. Edmund Halley (1656-1742) applique cette nouvelle physique pour prédire le retour des comètes. Des colonies de savants partent aux quatre coins de la planète en de périlleuses expéditions. Ils vont mesurer l'arc de méridien terrestre pour vérifier l'aplatissement du globe terrestre à ses pôles ; ils vont chronométrer le fugitif passage de Vénus devant le disque du Soleil pour mesurer les dimensions vraies du système solaire.

La mécanique céleste n'est pas seule à connaître un tel renouveau. Dégagés du présupposé créationniste prôné par l'Église, les astronomes commencent aussi à s'interroger sur l'origine des astres. Kant (1724-1804) imagine l'existence d'autres galaxies semblables à la Voie lactée. Laplace (1749-1827) propose un modèle convaincant de formation du système solaire. William Herschel (1738-1822) découvre au télescope une nouvelle planète, Uranus, ainsi que d'innombrables nébuleuses, son fils John (1792-1871) poursuit son travail et suspecte nombre de ces nébuleuses d'être des berceaux d'étoiles en formation. Leverrier enfin (1811-1877) découvre par le calcul l'existence de la planète Neptune. L'influence scientifique et culturelle de Newton reste ainsi hégémonique jusqu'au début du XX^e siècle.

Entre-temps, les théories sur la lumière se sont développées. Le

concept d'éther, en tant que support de propagation des ondes lumineuses, refait surface. Certains supposent alors que la véritable unité du monde n'est pas achevée par la loi d'attraction, mais par ce réseau de lumière impalpable qui tisse l'espace cosmique. Sur cette base, Albert Einstein (1879-1955) élabore la relativité restreinte, dans laquelle l'espace et le temps dépendent de la vitesse, et la relativité générale, dans laquelle la gravitation induit une courbure de l'espace-temps. Cette dernière théorie, publiée en 1915, propose un nouveau cadre de compréhension de l'Univers en termes d'un espace-temps élastique, tissé par la lumière, courbé par la matière. Elle fait appel aux géométries non euclidiennes, découvertes par les mathématiciens du siècle précédent. La richesse et la complexité de celles-ci permettent d'attribuer à l'espace une structure courbe et non plus plate, souple et non plus rigide.

La cosmologie qui en découle est d'une richesse sans précédent. Sur la question de l'extension spatiale, les deux possibilités – espace fini ou infini – sont admissibles au sein de la théorie. Surtout, Alexandre Friedmann et Georges Lemaître élaborent entre 1922 et 1927 le concept d'univers *dynamique*, où espace et matière, contenant et contenu, évoluent au cours du temps. La fuite générale des galaxies et le rougissement de leur spectre, découverts à la même époque par Edwin Hubble, traduisent la réalité expérimentale de l'expansion cosmique.

La théorie de l'atome primitif que Lemaître propose en 1931, dans laquelle il décrit scientifiquement la naissance de l'Univers en se fondant sur les équations de la relativité, forme la base de ce que les astrophysiciens appellent aujourd'hui « modèles de Big Bang ». En réalité, la variété de tels modèles est grande. Leur dynamique, c'est-à-dire la variation du facteur d'échelle spatiale en fonction du temps cosmique, dépend en effet de deux paramètres : le signe de la courbure spatiale, et la valeur de la constante cosmologique.

Comme cette dernière équivaut à une action répulsive à grande distance, elle contrebalance la gravitation, toujours attractive. Tous les modèles à grande constante cosmologique, quelle que soit leur courbure, sont donc « ouverts » dans le temps, c'est-à-dire en expansion perpétuelle. À l'inverse, les modèles sans constante cosmologique et à courbure positive sont en expansion-contraction. Dans quel cas de figure nous situons-nous ? Depuis soixante-dix ans, la cosmologie relativiste ne cesse d'affiner ses observations et ses théories pour trancher le dilemme. Un modèle à explosion primordiale, initialement prôné par Lemaître, vient tout récemment d'être remis à l'ordre du jour par des astronomes qui ont observé les distances de supernovæ. Dans ce dernier et provisoire système du monde – comme on pourrait parler de la dernière création à la mode

–, la constante cosmologique est suffisamment grande pour que l'Univers soit en expansion continûment accélérée. La mystérieuse constante cosmologique, qui trouverait sa source dans l'énergie latente du vide quantique, a été rebaptisée... *quintessence*. Singulier et juste hommage aux bâtisseurs d'univers de l'Antiquité qui, comme le rappelle Arthur Koestler, ouvrirent la voie à une meilleure modélisation du cosmos tout en progressant péniblement dans les brouillards des thèses erronées.

Harmonie du monde et unification

Toute l'histoire de la physique traduit la volonté de déceler un ordre, une harmonie cachée dans l'essence des phénomènes. Pour les physiciens les plus inventifs, cette recherche passe par l'unification de concepts apparemment distincts.

Les penseurs grecs avaient déjà restreint le nombre d'éléments fondamentaux (terre, eau, air, feu, éther). La renaissance scientifique du XVII^e siècle peut se lire comme une suite d'unifications réussies, par Galilée et Newton essentiellement. La première rassemble dans le concept d'Univers les mondes sublunaire et supralunaire, auparavant distincts. La deuxième unifie la matière (la même partout) et les mouvements (dynamique et gravitation universelles). Au XIX^e siècle, James Clerk Maxwell réunit électricité, magnétisme et lumière dans sa théorie électromagnétique. Les autres types de rayonnement électromagnétique (infrarouges et ultraviolets, puis ondes radio, rayons X et rayons gamma) seront bientôt incorporés dans ce schéma. Au début du XX^e siècle existait encore une contradiction apparemment insurmontable entre la théorie électromagnétique et les lois de la dynamique newtonienne. La crise fut résolue par Albert Einstein : la relativité restreinte unifie mécanique et électromagnétisme, et associe espace et temps dans une même structure géométrique. La relativité générale élargit encore le cadre de l'unification : y sont incorporés espace, temps et gravitation, matière, rayonnement et énergie.

La recherche d'unité est plus que jamais au cœur des préoccupations de la science moderne. Des éléments plus abstraits, appelés interactions fondamentales, jouent un rôle organisateur identique aux Éléments des Anciens. Au nombre de quatre, elles régissent l'ensemble des phénomènes physiques connus. Mais quatre, c'est encore trop pour les chercheurs modernes d'unité ; selon eux, ces interactions ne seraient que les reflets à « basse énergie » d'une interaction unique, laquelle se serait manifestée lors de la création même de l'espace, du temps et de la matière, dans les énergies quasi infinies du Big Bang.

La quête d'une théorie complètement unifiée est l'enjeu théorique majeur du XXI^e siècle... à moins que l'on n'ait fait fausse route et que, comme le fit déjà remarquer Francis Bacon au XVII^e siècle, l'harmonie du monde soit une pure construction de l'esprit : « L'entendement humain incline naturellement à supposer l'existence de plus d'ordre et de régularité dans le monde qu'il n'en trouve. Et quoique il y ait dans la nature beaucoup de choses singulières et sans symétrie, il leur trouve des parallèles et des relations qui n'existent pas. »

1- Article paru en juillet 1999 dans la revue *Le Monde de l'éducation*, n° 272, « Comprendre le Ciel ».

Les récits de la création¹

« Connaître, c'est comparer une perception extérieure avec des idées intérieures, et la juger concordante avec elles. »

Johannes KEPLER,
Harmonices Mundi.

Comment sont nés l'Univers, le ciel, la Terre, les créatures, l'homme ? On trouve chez tous les peuples, dans le fonds le plus ancien de leurs traditions, des récits relatifs à l'origine, le plus souvent ancrés dans la religion. Ces cosmogonies reflètent et fécondent tout à la fois l'imagination des peuples.

Si Dieu précède sa création dans les religions monothéistes, la *théogonie* (récit relatant la naissance des dieux) succède à la cosmogonie dans la plupart des autres : les dieux sont eux-mêmes issus d'un élément premier, d'un *principe* créateur tels le Désir, l'Arbre, l'Œuf, l'Eau, le Vide, le Chaos. De tels principes créateurs se trouvent déjà invoqués dans les hymnes du *Rigveda*, la plus ancienne production littéraire de l'Inde composée entre 2000 et 1500 avant notre ère. L'Arbre cosmique, symbole de la croissance expansive du monde et de son unité vivante, se retrouve aussi bien en Inde que dans les traditions chaldéenne et scandinave. Le Désir, symbole anthropomorphe, est présent chez les Phéniciens comme chez les Maoris de Nouvelle-Zélande. L'Œuf, créateur du Prajâpati (le « maître des créatures ») dans les Veda, engendre les dieux Ogo et Nommo chez les Dogons du Mali, le géant P'an-kou en Chine, la voûte des cieux dans le mythe d'Orphée.

En Occident, le récit de la Genèse a dominé tout le questionnement cosmogonique jusqu'au XVIII^e siècle, en proposant une classification rationnelle en sept jours. L'apparition des théories mécanistes a fait progressivement passer de la notion de création à celle d'évolution. Au XIX^e siècle, l'astrophysique a découvert les berceaux des étoiles, sous forme de nébuleuses gazeuses. La théorie du Big Bang, forgée au début du XX^e siècle et par la suite améliorée, propose un panorama quasi complet de l'évolution cosmique, depuis

la naissance de l'espace-temps-matière dans le vide quantique jusqu'à l'émergence de la complexité. Les télescopes les plus perfectionnés montrent les germes des premières galaxies, les accouchements d'étoiles au sein de nuages d'hydrogène interstellaire, les parturitions de planètes dans des disques de poussières. Nous sommes dans un cosmos où la genèse est toujours en cours. L'origine de la vie demeure la plus grande énigme : la science bute toujours sur le problème de l'émergence des formes, qui reste un des secrets les mieux gardés de la création.

Si la question des origines a suscité de nombreux récits mythiques, elle nourrit donc aujourd'hui les recherches les plus brûlantes de l'astrophysique, de la biologie et de la paléoanthropologie. Appuyée par des théories de physique fondamentale (relativité générale, mécanique quantique, physique nucléaire) et contrainte par des observations de plus en plus précises, la cosmogonie moderne – rebaptisée « cosmologie » pour les raisons évoquées ci-dessous – est devenue une discipline scientifique à part entière. Elle présente cependant des particularités qui font que son statut épistémologique ne fait pas l'unanimité auprès de la communauté des physiciens. Tentons de comprendre pourquoi.

Le discours sur le cosmos a considérablement changé d'objet au cours du temps. Homère emploie le mot pour décrire la parure des femmes, les ornements du guerrier, la tournure d'un poème, le bel aspect physique, moral ou social (ce dernier sens se retrouve dans le terme latin *mundus*, et l'expression « homme du monde », qui en dérive, conserve cette image de « belles manières »). La notion de cosmos appliquée à l'organisation de l'Univers apparaît chez Pythagore et les présocratiques, vers le VI^e siècle av. J.-C., pour désigner l'ordre et la beauté du monde. Le cosmos est ainsi opposé au chaos que décrivait deux siècles plus tôt Hésiode dans sa *Théogonie* ; l'ordre d'en haut contraste avec le désordre d'ici-bas. Le poème *De la nature*, d'Héraclite, affirme : « Parmi les choses répandues au hasard, le plus beau : le cosmos. » Dans son dialogue le *Timée* – un véritable traité esthétique de cosmologie –, Platon fait du cosmos l'image d'un modèle intelligible.

Les philosophes de l'Antiquité sont donc les premiers à appliquer le *logos* – raison humaine incarnée par le langage – au *cosmos*. Bref, les premiers à faire de la « cosmologie ». Il faudra pourtant deux millénaires pour qu'un tel discours sur l'Univers porte enfin ce nom. Le terme anglais *cosmology* n'est mentionné pour la première fois qu'en 1656, dans le dictionnaire *Glossographic* de Thomas Blount, où il est défini comme le discours sur le monde, ce qui correspond exactement à son étymologie. Il est repris, en latin, dans l'ouvrage de Christian Wolff, *Cosmologia generalis* (1731) : « La cosmologie générale

est la science du monde ou de l'univers en général, dans la mesure où il est un être composé et modifiable. »

Wolff s'efforce d'aborder les questions portant sur la nature physique du monde en se dégageant le plus possible du mythe et de la religion. Malgré tout, une constante dans toute l'histoire ultérieure de la cosmologie est le reproche qui lui sera intenté de faire s'interpénétrer les énoncés physiques et les réflexions philosophiques ou religieuses. Quand le terme français est utilisé par Pierre de Maupertuis (*Essai de cosmologie*, 1750), l'auteur affirme, après avoir constaté que les philosophes ont toujours voulu expliquer le système du monde, qu'il nous est impossible d'atteindre à une solution complète de ce problème. Lorsque le mot est consacré l'année suivante dans l'*Encyclopédie*, Jean Le Rond d'Alembert, auteur de l'article, note que le sujet n'est guère digne d'intérêt, car il se réduit à la question de savoir si on peut trouver Dieu dans la nature. Selon Emmanuel Kant (*Critique de la raison pure*, 1755), « aucune observation ne saurait confirmer la thèse de la cosmologie rationnelle, dont l'objet dépasse toute expérience possible ». Au XIX^e siècle, Auguste Comte dira encore que seule est possible l'étude du système solaire, à la différence de celle de l'Univers, qui nous échappera toujours.

Il est facile de comprendre les réticences des positivistes envers la discipline. Si l'astronomie est là pour parler des astres et de leur organisation, de quoi peut bien parler la cosmologie ? De ce qui se cache derrière cette organisation ? On tombe alors sur l'idée d'Être suprême et sur les questions religieuses. De notre place à nous, humains, dans cette organisation ? Si l'on n'est pas une nouvelle fois dans la religion, on est à tout le moins dans la philosophie. Même chose pour les questions du type : l'Univers est-il né et, si oui, quand et comment ? En bref, si l'on s'intéresse à l'Univers et qu'on ne dispose pas de télescopes ultrapuissants, que peut-on en dire ? Parler de l'Univers comme d'un tout, c'est savoir se placer comme extérieur à lui. Or, depuis la chute du système du monde clos d'Aristote, c'est devenu impensable. L'Univers newtonien se confond avec l'espace et le temps euclidiens infinis. Sa partie observable ne cesse de grandir, de s'approfondir, mais ses plus lointains abîmes semblent à jamais inaccessibles à l'expérience humaine. Les considérations sur son organisation générale ne peuvent être étayées par aucune observation proprement cosmologique. Les modèles restent plaqués sur des présupposés métaphysiques. C'est notamment le cas avec la cosmologie newtonienne et ses adaptations par Wright, Lambert et autres penseurs des XVIII^e et XIX^e siècles.

La situation change du tout au tout au XX^e siècle, avec l'avènement de la relativité générale. L'Univers prend un sens nouveau : ce n'est plus un cadre contenant des objets, c'est l'ensemble

cadre-objets. Pour la première fois, il devient licite de tenir un discours rationnel sur le tout. La cosmologie relativiste contredit notamment l'argumentation de Kant et Comte : il est possible de parvenir expérimentalement à déterminer les paramètres cosmologiques fondamentaux, voire à prouver le caractère fini de l'espace (à condition que soit vérifiée l'hypothèse d'homogénéité).

Il ne faut pas croire pour autant que l'interpénétration entre physique et philosophie ait cessé avec la cosmologie relativiste. La cosmologie n'est jamais innocente. Quel que soit le degré de sophistication du formalisme mathématique sur lequel elle se fonde, elle suppose une philosophie de la nature, où il est possible d'attribuer au monde une forme, une structure, un ordre. Le mot « Univers », synonyme de « cosmos » mais tiré du latin, contient les notions d'unité et de diversité. L'Univers, c'est l'unité du divers. Il y a unité du divers s'il existe des lois naturelles universelles. Ces lois sont censées agir en tout point de l'espace et à tout moment du temps, être donc indifférentes à l'espace-temps. Elles rassemblent ce que l'espace et le temps tendent à disperser. Pour les physiciens théoriciens en quête d'unité, la cosmologie a pour propos d'expliquer la foisonnante multiplicité visible dans l'univers matériel – depuis les particules élémentaires jusqu'aux superamas de galaxies – par une unité sous-jacente, c'est-à-dire par un certain ordre caché, une certaine harmonie.

Et c'est là que le bât blesse pour nombre de physiciens empiristes, selon lesquels il ne peut y avoir de connaissance qu'à travers l'expérience. En effet, à l'instar de certaines rêveries cosmologiques préscientifiques comme *Le Songe de Scipion* de Cicéron, *Le Songe* de Kepler ou *l'Eurêka* d'Edgar Poe, la cosmologie moderne reste une science qui présuppose souvent le pari théorique (le « Songe ») avant toute expérimentation sensible (le « Chiffre »)². Au milieu des années 1970, le physicien suédois Hannes Alfvén a donc pu se livrer à une critique épistémologique féroce de la cosmologie. Est-elle toujours un mythe ou s'est-elle enfin constituée en une science ? Comment construire une science sur un objet unique ? Comment étudier un objet dont, par définition, on ne peut pas s'extraire pour le regarder de loin ? L'autorité indéniable de ce prix Nobel de physique en ébranla plus d'un quant à la validité de la démarche du cosmologiste.

Ce type d'argumentation méconnaît, en premier lieu, la différence entre représentation mythique et représentation scientifique. Ce ne sont pas les vagues analogies qu'il est toujours possible de relever entre tel mythe fondateur et tel modèle scientifique contemporain de l'origine de l'Univers qui autorisent à réduire le second au premier. Rien de mystérieux ni de surprenant dans ces correspondances, sinon la permanence de certaines prescriptions imposées à la pensée dans l'élaboration de modèles du monde.

Prenons l'exemple de la création du monde à partir d'un supposé « chaos » originel. Déjà la *Théogonie* d'Hésiode (VIII^e siècle av. J.-C.) raconte les différentes phases de la naissance des dieux à partir du chaos, proposant ainsi une réponse aux éternelles interrogations cosmogoniques : qui a créé le monde, à partir de quel matériau primitif a-t-il été conçu, dans quel ordre sont apparus les dieux, les astres et les éléments ? De même, *Les Métamorphoses* d'Ovide puisent dans le riche répertoire de la mythologie grecque et des fables romaines pour retracer les métamorphoses des choses et des êtres, depuis le chaos jusqu'à la transformation en étoile de Jules César : « Avant la mer, la terre et le ciel qui couvre tout, la nature, dans l'Univers entier, offrait un seul et même aspect ; on l'a appelé le chaos ; ce n'était qu'une masse informe et confuse, un bloc inerte, un entassement d'éléments mal unis et discordants³. »

Selon Hésiode, le monde fut toutefois créé *ex vacuo*, c'est-à-dire à partir d'un état préexistant, le « vide », et non pas *ex nihilo*, à partir de rien. Cette question est des plus fondamentales, la création *ex nihilo* correspondant à l'interprétation courante de la Bible dans la tradition judéo-chrétienne. Mais les premiers versets de la Genèse, le livre de Job ou le second livre des Maccabées exposent des versions légèrement différentes. Cette disparité a suscité des siècles d'exégèse. Deux interprétations des Écritures sont donc possibles : celle qui admet la préexistence d'une masse informe et vide⁴, et celle qui prétend qu'aucune matière n'existait avant la Création, doctrine aujourd'hui largement dominante dans le monde chrétien.

Le mythe du chaos originel préfigure logiquement certaines descriptions modernes de l'origine de l'espace-temps. Puisque l'univers visible est apparemment ordonné (bien qu'imparfait), il semble logique de décrire l'état antérieur à sa création par un terme synonyme de désordre et de confusion – éventuellement descriptible en termes probabilistes. Ainsi, la cosmologie quantique, qui est actuellement l'une des formes les plus élaborées de la cosmogonie scientifique, se fonde sur les théories de la relativité générale et de la physique quantique pour mettre en équations le surgissement spontané de l'Univers à partir des fluctuations du « vide quantique ». Ce dernier ne ressemble nullement au vide traditionnel ; il est semblable à un océan virtuel sans cesse agité d'ondes d'énergie, lesquelles peuvent engendrer spontanément des paires de particules et d'antiparticules. Ces couples éphémères, s'annihilant aussitôt apparus, laissent la place à une écume bouillonnante d'énergie et perpétuellement changeante, poétiquement appelée « écume de l'espace-temps ». Au hasard des fluctuations chaotiques, il peut arriver qu'une particule et son antiparticule soient suffisamment séparées pour ne plus pouvoir s'annihiler mutuellement. De la « matière »

surgit alors du vide. Notre univers tout entier pourrait être né ainsi d'une énorme fluctuation du vide, démesurément grandie sous l'effet de l'expansion.

Un autre parallèle instructif entre récits mythiques et récit scientifique (on notera le pluriel pour les uns et le singulier pour l'autre) concerne l'ordre de la création. Selon le Rig Véda (X, 90), « l'Ordre et la Vérité sont nés de l'Ardeur qui s'allume. De là est née la Nuit. De là l'Océan et ses ondes. De l'Océan avec ses ondes naquit l'Année, qui répartit jours et nuits, régissant tout ce qui cligne des yeux. L'Ordonnateur a mis en forme le Soleil et la Lune, en rang de priorité ; le Ciel et la Terre ; l'Espace aérien ; enfin la Lumière ». L'ordre védique de la Création diffère donc radicalement de celui prôné par la tradition judéo-chrétienne. Cette dernière est magnifiquement illustrée dans les *Chroniques de Nuremberg*, publiées en 1493 par Hartmann Schedel. Marquant en quelque sorte la transition entre la scolastique médiévale et les nouvelles interrogations de la Renaissance, l'ouvrage marque un désir de syncrétisme : les principaux récits de la Création (la Genèse, le *Timée*, la *Théogonie*, *Les Métamorphoses*) sont amalgamés pour produire un récit unique les embrassant tous.

Le premier jour, la main de Dieu jaillit du ciel pour séparer la lumière et les ténèbres. C'est la première différenciation du chaos, ne mettant encore en jeu aucune substance matérielle. Le deuxième jour, la main de Dieu sépare le firmament des eaux inférieures, différenciant les composantes substantielles du chaos. Le troisième jour, la main de Dieu réunit les eaux sous le firmament en un lieu, de sorte que la terre sèche peut apparaître, le monde étant dès lors divisé entre la terre et les mers. Le quatrième jour, le temps entre en jeu, et de nouveaux modes de perception sont requis. Les corps célestes entament leur course circulaire dans le ciel et commencent à marquer le passage du temps. Le monde est partagé en régions identifiables. L'illustrateur reproduit le diagramme familier de l'univers géocentrique de Ptolémée. Au milieu se tient la Terre, la tête en bas. Puis viennent trois sphères non nommées pour les éléments eau, air, feu. Ensuite viennent les sept sphères des planètes – en commençant par la Lune, puis Mercure et Vénus, ensuite le Soleil, enfin les sphères de Mars, Jupiter et Saturne. Le français *planète* est dérivé du grec *planêtes*, qui signifie « astre errant », par opposition aux étoiles fixes, qui maintiennent leurs positions relatives nuit après nuit. Puisque les étoiles fixes doivent aussi entrer dans le schéma, la sphère qui contient les constellations et décorée d'étoiles est dessinée en dehors de la sphère planétaire. Toutes les étoiles sont à égale distance de la Terre. Il y a enfin une sphère représentant le Premier Moteur, la cause sans cause antécédente dite Cause première, qui marque la frontière entre

l'univers, fini, et l'empyrée, infini, et qui assure aux sphères inférieures un mouvement circulaire uniforme.

Le cinquième jour, les créatures de la terre, de la mer et de l'air, que Dieu a créées, peuplent la Terre. Le sixième jour est l'acte de création d'Adam, point culminant de la genèse. Jusqu'ici, le Démenteur avait été représenté par une main sans visage, simple instrument. Maintenant, il est représenté en entier, faisant surgir avec sa main gauche le premier homme à partir d'une poignée de glaise, tandis que sa main droite le bénit. Dieu et la créature façonnée à son image se font face dans une attitude de *caritas*, tandis que les bêtes de l'Éden musardent dans une nature paisible qui s'étend sans perturbation jusqu'à l'horizon. Le septième jour, ayant accompli sa tâche Dieu se repose dans toute sa gloire et contemple son œuvre. Le tableau de l'Univers est devenu « complet » dans l'espace et dans le temps. Sous les pieds de Dieu tourbillonne le cosmos qu'il a mis en mouvement le quatrième jour. De part et d'autre de son trône, et protégeant l'œuf cosmique, sont les neuf ordres des anges, tandis que des quatre coins du monde soufflent les vents cardinaux.

Sur le plan astronomique, on peut remarquer que, dans la Genèse, la séparation de la lumière et des ténèbres est accomplie dès le premier jour, le Soleil et la Lune n'apparaissant qu'au quatrième. La lumière du premier jour n'est donc pas celle des astres. Le texte biblique traduit ainsi une croyance très ancienne, selon laquelle la lumière et les ténèbres sont indépendantes des corps célestes : le Soleil, la Lune et les étoiles n'existent pas pour donner la lumière mais seulement pour l'accroître, pour distinguer le jour et la nuit, pour marquer le passage des saisons, etc.

Passons au récit scientifique moderne. La chronologie de l'Univers est aujourd'hui bien établie dans le cadre des modèles de Big Bang. Les astrophysiciens estiment avoir reconstitué de façon plausible une histoire cosmique longue de 14 milliards d'années, en remontant dans le passé jusqu'au premier dix milliardième de seconde. À cette époque, l'Univers était si dense et si chaud qu'il était opaque. Environ 300 000 ans plus tard, il a émis sa première lumière, que l'on capte aujourd'hui dans les radiotélescopes. Un milliard d'années après se sont formées les premières galaxies, dont sans doute la nôtre. Au sein de la Voie lactée, plusieurs générations d'étoiles se sont succédé. Le Soleil s'est condensé une dizaine de milliards d'années plus tard, soit, en reprenant le chronomètre à partir du présent, il y a 5 milliards d'années. Assez rapidement, les planètes se sont agglomérées, les datations les plus précises sur l'âge de la Terre indiquant 4,56 milliards d'années. La vie aquatique a surgi dès que l'intense bombardement météoritique initial a cessé et que la Terre s'est refroidie : des organismes monocellulaires sont apparus dans les

océans voici 3,5 milliards d'années. Puis tout s'est précipité. Il y a 600 millions d'années sont apparus les premiers vertébrés, il y a 200 millions d'années les premiers mammifères et il y a 7 millions d'années les premiers hominidés. L'apparition de notre espèce, *Homo sapiens*, remonte à peine à 200 000 ans. Avec les premières sépultures, datées de 100 000 ans, les paléanthropologues considèrent que l'homme a fait le pari du spirituel, donc qu'il a « créé » Dieu. Telle est la nouvelle genèse de la cosmologie moderne !

Il est clair que la cosmologie scientifique et les cosmologies mythiques ne remplissent pas la même fonction, ne sont pas soumises aux mêmes contraintes. Le mythe cosmologique porte un message qu'une collectivité transmet pour garder en mémoire ce qui n'est vérifiable ni par le transmetteur ni par le récepteur. Son but n'est pas de dire ce qui s'est réellement passé au début, mais de fonder une organisation sociale ou religieuse, voire une morale. Le mythe offre aussi plusieurs degrés d'interprétation. La cosmologie scientifique, de son côté, découvre ce qui s'est passé d'un point de vue matériel en des temps reculés, au moyen de théories appuyées par des observations. Construite le plus souvent contre les mythes traditionnels, elle leur a substitué de nouveaux récits sur l'origine et l'organisation du cosmos, malléables et adaptables au gré des données expérimentales.

Cependant, pourquoi feindre d'ignorer que l'imagination créatrice des scientifiques fait indéniablement appel à des images mythiques ? Par exemple, les principes générateurs présents dans toutes les cultures – le Désir, l'Arbre, l'Œuf, l'Eau, le Vide, le Chaos – apparaissent clairement comme des *archétypes* de la pensée cosmogonique : des symboles primitifs et universels appartenant à l'inconscient collectif (selon la terminologie de Jung). Le terme d'archétype a d'ailleurs été utilisé pour la première fois par l'un des plus grands cosmologistes de l'histoire, Johannes Kepler : « Les traces de la géométrie sont imprimées dans le monde, comme si la géométrie était une sorte d'archétype du monde », a-t-il écrit dans *De stella nova* (1606).

Certes, l'œuvre des grands créateurs dans le domaine de la physique fondamentale ne laisse que rarement apparaître l'arrière-plan philosophique qui la fonde. En première lecture, on est la plupart du temps tenté de conclure à un rationalisme extrême et à une position fondamentalement sceptique. En réalité, derrière l'esprit critique du physicien inventif se cache souvent un profond intérêt philosophique pour tout ce qui a trait aux régions obscures de la réalité ou à celles de l'imaginaire humain, lesquelles se trouvent en apparence opposées au concept de la raison. L'œuvre de réflexion épistémologique d'un Wolfgang Pauli, par exemple, exerce le scepticisme envers le scepticisme même, afin de traquer la façon dont

se construit la connaissance, avant qu'on en arrive à la compréhension rationnelle des choses.

On ne peut se voiler la face devant l'influence des représentations archétypiques sur la formation des théories scientifiques. Le physicien théoricien ne peut se satisfaire d'une vision purement empirique, selon laquelle on ne pourrait établir de lois naturelles qu'à partir d'un matériau expérimental. Il s'agit plutôt de s'interroger sur le rôle joué par les décisions que l'on prend dans le processus d'observation et quel est celui que joue l'intuition. Le pont qui relie le matériau expérimental initialement désordonné est situé dans certaines images originelles qui préexistent dans l'inconscient collectif. Ces archétypes ne sont pas liés à des idées rationnellement formulées. Il s'agit plutôt de formes ou d'images à fort contenu émotionnel, que l'on ne saisit pas par la pensée. Le « cas Kepler », auquel Pauli a consacré un ouvrage⁵, est à cet égard exemplaire. Pauli prend l'exemple de l'adoption par Kepler du système copernicien ; selon lui, le pouvoir de persuasion du système copernicien s'exerce avant tout chez Kepler grâce à la correspondance qu'il y trouve avec le symbole trinitaire (archétype de la pensée chrétienne). Le « somnambulisme » propre aux grands créateurs de la cosmologie prérelativiste, de Ptolémée à Newton, a aussi été magistralement décortiqué par Arthur Koestler⁶.

Cette conception de la connaissance de la nature, selon laquelle l'ordre unitaire du cosmos n'est initialement pas formulable de façon rationnelle, renvoie pour l'essentiel à Platon et au néoplatonisme de Plotin et Proclus, mais avec une différence essentielle. Chez Platon, les images originelles sont immuables et existent indépendamment de la conscience humaine (Platon utilise le terme « âme »). L'utilisation que fait Emmanuel Kant du concept de forme *a priori* de la sensibilité, appliquée au cadre géométrique, est tout autant critiquable : cela l'a conduit à soutenir que les postulats d'Euclide étaient inhérents à la pensée humaine. Or les archétypes de la psychologie jungienne ne sont pas figés, ils peuvent évoluer relativement à une situation donnée de la connaissance. Le cosmologiste cherche à décrire cette étendue indéfinie qu'est l'espace au moyen d'un modèle géométrique. Plusieurs modèles sont possibles : la description obtenue dépend notamment du degré de finesse avec lequel l'espace physique est analysé. De fait, pendant longtemps, l'espace euclidien fut le seul espace connu des mathématiciens. En outre, l'être humain a une tendance instinctive à interpréter ses perceptions sensorielles dans le sens de la géométrie euclidienne. Il a été démontré que les canaux semi-circulaires de notre oreille interne, qui détectent les accélérations angulaires de la tête dans trois plans perpendiculaires, construisent un espace mental de structure localement euclidienne. Il a donc fallu un singulier travail intellectuel pour comprendre que les postulats de celle-ci ne sont pas

les seuls possibles. Affirmer que l'espace possède trois ou onze dimensions, qu'il est fini ou infini, plat ou courbé, monoconnexe ou chiffonné, etc., n'a rien d'évident, c'est même contre-intuitif ! En cas, l'idée doit nécessairement préexister à l'expérience sensible.

Bien que variables au gré de l'histoire, les archétypes sont toujours le témoignage d'un ordre général du cosmos qui englobe l'esprit et la matière. C'est à ce stade que les images inconscientes – ou, si l'on préfère, les présupposés métaphysiques – peuvent favoriser plus ou moins obscurément telle ou telle direction de recherche. La cosmologie relativiste fourmille de tels exemples tout au long de son histoire, pourtant brève de quatre-vingts ans. Einstein, l'inventeur de la théorie de la relativité générale qui sert aujourd'hui de principale base scientifique à toute étude cosmologique, n'y a pas échappé. Parmi les nombreuses solutions possibles de ses équations, il a choisi en 1917 celle, très particulière, décrivant un univers fini et statique, obligé pour cela de modifier ses équations d'origine. Ce choix lui a d'ailleurs valu de passer à côté de la « couche » conférant à la cosmologie relativiste son statut de science expérimentale : la découverte, avec l'expansion cosmique, que le « tout » évolue, que l'Univers a une histoire. Il appartient au mathématicien russe Alexandre Friedmann de franchir le pas qu'Einstein n'avait pas été prêt à faire. Dans un article paru en 1922, *Sur la courbure de l'espace*, Friedmann a abandonné l'hypothèse d'un univers statique et a découvert des solutions « dynamiques » de la relativité générale, décrivant un espace qui varie en fonction du temps. Discutant de l'âge de l'Univers, Friedmann a proposé une valeur de quelques dizaines de milliards d'années, beaucoup plus élevée que les âges estimés de la Terre (autour de 1 milliard d'années à l'époque) et des plus vieux objets célestes. Les chiffres avancés aujourd'hui pour l'âge de l'Univers (15 milliards d'années) confirment et précisent cette remarquable prédiction.

Le terme de « création du monde », lancé par Friedmann dans le champ de la cosmologie relativiste, a suscité remous et malentendus, bloquant psychologiquement la plupart des physiciens. Au premier rang figurait Einstein qui, dans un premier temps, entendit réfuter Friedmann sur la base d'une erreur de calcul. Or c'est Einstein qui commettait l'erreur, et il s'est rétracté peu après. Il n'acceptera toutefois jamais l'idée d'un commencement du monde.

Friedmann disparut prématurément en 1925, sans avoir eu la satisfaction de voir ses idées cosmologiques étayées par la moindre observation. Au même moment, le physicien belge Georges Lemaître revenait des États-Unis pour enseigner à l'Université de Louvain. Informé des observations américaines et expert en théorie de la relativité générale, il reprit, indépendamment, les intuitions

prémonitoires de Friedmann et les amplifia jusqu'à en faire la base de la théorie moderne du Big Bang. Redécouvrant les solutions cosmologiques dynamiques des équations d'Einstein, il prit en compte les observations de Slipher et de Hubble mettant en évidence un décalage vers le rouge quasi systématique des raies spectrales du rayonnement des galaxies, ce qui semblait impliquer de très grandes vitesses d'éloignement. En 1927, dans son article fondamental *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques*, Lemaître donna un sens physique à ces observations en les interprétant, dans le cadre de la relativité générale, comme l'indice d'un univers en expansion – bien que sans commencement. Il y annonça même la relation de proportionnalité entre la vitesse de fuite d'une galaxie et sa distance. L'article – en français – du jeune savant belge ne fut pas plus apprécié que ne l'avaient été ceux de son prédécesseur russe. Lors de sa première rencontre avec Lemaître en 1927, Einstein conclut, à côté de quelques remarques techniques favorables, que cela lui paraissait « tout à fait abominable » du point de vue physique.

En 1929, Hubble énonça à son tour, sur des bases purement observationnelles, la loi de proportionnalité entre la vitesse de fuite d'une galaxie et sa distance. Quasiment identique à celle de Lemaître, y compris dans les grandeurs numériques mises en jeu, cette loi porte désormais son nom. En 1931, la communauté cosmologique adopta enfin les résultats de Lemaître, qu'avait révélés (et fait traduire) Arthur Eddington. L'univers dynamique, en expansion, devint le nouveau paradigme cosmologique. Einstein lui-même finit par l'accepter. Cette expansion s'opère en tout point d'un espace (fini ou infini), et non pas depuis un centre localisé (à cet égard, l'analogie souvent utilisée du ballon que l'on gonfle est trompeuse). Il ne s'agit pas d'un mouvement général de la matière dans un cadre géométrique fixe, mais d'une dilatation de ce cadre lui-même, du « tissu » élastique de l'espace-temps.

Au même moment, le savant belge franchit un pas supplémentaire, osant une hypothèse encore plus audacieuse : si l'Univers se dilate aujourd'hui, n'a-t-il pas été beaucoup plus petit et plus dense dans le passé ? Soucieux de lier les nébuleuses aux atomes, Lemaître s'appuya sur les nouvelles connaissances de la physique atomique et des phénomènes radioactifs : « Une cosmogonie vraiment complète devrait expliquer les atomes comme les soleils. » Dans un lointain passé, l'Univers devait avoir été condensé, dans un état singulier, sous forme d'un « atome primitif » que Lemaître conçut comme un « quantum » unique, faisant référence à la physique quantique alors balbutiante. « Nous pouvons concevoir que l'espace a commencé avec l'atome primitif et que le commencement de l'espace

a marqué le commencement du temps », ajouta-t-il.

Lemaître développa cette idée capitale dans *L'Expansion de l'espace*, ouvrage publié (en français) en novembre 1931. Selon lui, l'histoire cosmique avait commencé par une expansion de type explosif, issue de la désintégration radioactive d'un atome-univers. Lemaître utilisa l'image poétique du « feu d'artifice », pédagogiquement contestable car à la source d'un malentendu constamment reconduit par la littérature de vulgarisation ; le Big Bang y est en effet très souvent présenté – à tort – comme une explosion ponctuelle de matière dans un espace extérieur. Par la suite, désintégration et fractionnements successifs ont façonné l'Univers tel qu'il est maintenant.

L'idée fut très mal reçue par la communauté des physiciens. Ces derniers rejetèrent cette théorie qui faisait tout sortir du néant, n'y voyant qu'une variante mathématisée des Livres Saints. Le fait que Lemaître soit mathématicien, ainsi que son engagement religieux (il avait été ordonné prêtre en 1923), ont sans doute cristallisé les résistances naturelles qui accompagnent inmanquablement l'instauration d'une nouvelle vision du monde. Il faut toutefois souligner, eu égard aux tempêtes de protestations soulevées chez les physiciens par les termes de « genèse » et de « création », que Lemaître ne confondit jamais science et religion. Au contraire, sa conception *naturelle* de l'origine s'opposait à une création *supernaturelle*. « Je pense que quiconque croit à un être suprême soutenant chaque être et chaque acte, croit aussi que Dieu est essentiellement caché, et peut se réjouir de voir comment la physique actuelle fournit un voile cachant la création », écrivit-il dans un texte inédit de 1931. Il conserva toute sa vie cette conception du Dieu suprême et inaccessible, gardant l'origine naturelle du monde dans les strictes limites de la physique.

Lemaître joua cependant de malchance : le 22 novembre 1951, le pape Pie XII déclara devant l'Académie pontificale : « Il semble en vérité que la science d'aujourd'hui, remontant d'un trait des millions de siècles, ait réussi à se faire le témoin du *Fiat lux* initial. Vers cette époque, le cosmos est sorti de la main du Créateur. » Farouche adversaire d'un tel concordisme, Lemaître utilisa les services d'un ami jésuite pour transmettre un message remettant respectueusement les choses en place. Le 7 septembre 1953, devant l'assemblée générale de l'Union astronomique internationale, Pie XII amenda effectivement son discours, admettant que la cosmologie scientifique ne parlait ni de *Fiat lux* ni de création.

En 1950, lorsque Lemaître publia – en anglais – un ouvrage récapitulatif de sa pensée, *L'Hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie*, sa théorie n'était plus à la mode. Depuis deux ans triomphait la théorie cosmologique alternative de l'« état

stationnaire », dont les promoteurs principaux étaient l'Américain Thomas Gold et les Britanniques Hermann Bondi et Fred Hoyle. Leur idée était que l'Univers avait toujours été et serait toujours comme il est maintenant, identique à lui-même au cours du temps. Leur hypothèse de base, appelée « principe cosmologique parfait », se référait explicitement à Aristote : ce dernier soutenait en effet que le monde était inengendré et indestructible, sans commencement ni fin, s'opposant en cela à Platon qui, dans le *Timée*, avait exprimé l'idée que le monde avait eu un début et qu'il aurait une fin. Pour compenser l'expansion de l'espace observée et la dilution de la matière qui en résulte, les partisans de l'univers stationnaire durent faire appel à un processus de création continue de matière. Fred Hoyle montra que ce modèle pouvait se réaliser à condition d'introduire dans les équations un « champ de création » inventé pour l'occasion et conçu comme un réservoir d'énergie négative se manifestant tout au long de l'histoire cosmique. Cette idée de création continue se trouvait déjà dans plusieurs traditions : chez les Aztèques, pour qui des sacrifices humains étaient nécessaires afin de régénérer en permanence le cosmos, chez Héraclite et les stoïciens en Occident. Les auteurs de la théorie de la création continue se rattachaient clairement à ce courant de pensée, mais ils durent « forcer » leur modèle scientifique pour l'accorder à leur point de vue philosophique, en introduisant des processus physiques non justifiés. La découverte du rayonnement de fond cosmologique, en 1965, infirma leurs hypothèses au profit des modèles évolutifs de Lemaître.

Pour conclure, le « récit de la création » proposé par le modèle de Big Bang ne serait jamais devenu une théorie scientifique s'il n'avait démontré son efficacité. C'est une idée qui doit « marcher », une idée qui prend des risques. Et notamment celui de prévoir des observations. C'est ainsi que Georges Lemaître et George Gamow, deux des pères de la théorie du Big Bang⁷, avaient annoncé l'existence d'un rayonnement cosmologique bien avant qu'il soit effectivement observé. Cette prise de risque des théories scientifiques les rend d'ailleurs souvent fragiles. Si la théorie du Big Bang avait été incapable de prévoir quelque chose de concret, les savants l'auraient vite laissée tomber. Si, demain, elle s'avérait incapable d'expliquer des phénomènes importants, pire, si elle était en contradiction avec lesdits phénomènes, alors, pas de doute, son destin serait scellé. Elle laisserait la place à une nouvelle théorie qui rendrait mieux compte de la réalité. Proposer, comme nous l'avons fait récemment⁸, un modèle d'espace de forme dodécaédrique n'est pas seulement un tribut payé par l'imagination à la beauté et à l'élégance ; l'intuition de la beauté ne permet pas à elle seule de comprendre le monde. C'est une prise de risque extrême : le modèle fait des prédictions expérimentales très précises, accessibles aux

instruments de notre génération (contrairement à des théories plus spéculatives et très à la mode comme les supercordes et les théories à dimensions supplémentaires). Or plus un modèle est précis et prédictif, plus il est fragile, car moins il a de chances de survivre à sa confrontation avec les faits expérimentaux.

C'est bien cela, le grand récit de l'Univers que portent en eux les théoriciens de la cosmologie : un Songe, aux ailes rognées par le Chiffre.

1- Article paru en 2008 dans « Récits du monde, récits de l'Homme », *L'Art du comprendre*, n° 17.

2- J. Blamont, *Le Chiffre et le Songe*, Paris, Odile Jacob, 1993.

3- Ovide, *Les Métamorphoses*, livre Premier, trad. G. Lafaye, Paris, Les Belles Lettres, 1991.

4- Par exemple saint Augustin, *De Genesi contra Manichaeos*, livre I, chap. IV.

5- W. Pauli, *Le Cas Kepler*, Paris, Albin Michel, 2002.

6- A. Koestler, *Les Somnambules*, Paris, Calmann-Lévy, 1960.

7- J.-P. Luminet, *L'Invention du Big Bang*, Paris, Seuil, « Poins Sciences », 2004.

8- J.-P. Luminet *et al.*, *Nature*, 9 octobre 2003, vol. 425, p. 593-595. J.-P. Luminet, *L'Univers chiffonné*, Paris, Gallimard, 2^e éd., 2005.

Aristote aujourd'hui¹

Le déclin des conceptions physiques d'Aristote a commencé au XVI^e siècle, avec notamment Pierre de la Ramée (1515-1572), qui déclara : « Tout ce qu'a dit Aristote n'est que fausseté. » Derrière cette affirmation sans doute excessive, il faut surtout voir une réaction contre la scolastique enseignée dogmatiquement en Sorbonne et dans les autres universités européennes. Qu'en est-il réellement ?

La cosmologie d'Aristote (exposée notamment dans son *Traité du Ciel*) repose sur un certain nombre d'hypothèses, lesquelles ont effectivement toutes été battues en brèche lors de la révolution astronomique des XVI^e et XVII^e siècles. Celle-ci, initiée par Nicolas Copernic, s'est poursuivie avec Tycho Brahe, Galilée et Johann Kepler, et a été couronnée par Descartes et Newton. Voyons plus en détail.

Les hypothèses astronomiques aristotéliennes (perfectionnées par Ptolémée au II^e siècle ap. J.-C.) sont les suivantes :

1. La Terre est absolument fixe au centre de l'Univers (géocentrisme).

2. Tous les corps célestes se meuvent autour d'elle, en suivant des orbites circulaires ou des combinaisons d'orbites circulaires (épicycles).

3. Les orbites sont des sphères solides, faites d'une matière cristalline transparente.

4. Le monde (Univers) est divisé en deux parties, régies par des lois physiques différentes : le monde sublunaire et le monde supralunaire.

5. Dans la sphère sublunaire, les corps sont composés des quatre éléments terre, eau, air, feu, et sont sujets au changement, à la génération et à la corruption. Leurs mouvements sont verticaux ou transversaux.

6. Dans la sphère supralunaire, les corps célestes sont formés d'une substance « parfaite », inaltérable et invariable : l'éther (ou quintessence). Leurs mouvements sont éternels et parfaits (d'où l'hypothèse de la circularité, image supposée de la perfection géométrique).

7. Les étoiles (dites « fixes » par opposition aux planètes dites « errantes ») sont toutes situées à la même distance de la Terre,

occupant une sphère qui clôturait le monde physique.

8. Les comètes ne sont que des phénomènes météorologiques (liés à l'atmosphère terrestre).

L'hypothèse du géocentrisme (1) est la première à être contestée par le chanoine polonais Nicolas Copernic (1473-1543). Dans son traité *La Révolution des orbés célestes* (1543), il propose un système « héliocentrique », dans lequel le Soleil est au centre géométrique du monde tandis que la Terre tourne autour de lui et sur elle-même. Mais Copernic ne touche pas aux autres hypothèses, notamment celle d'un cosmos clos, borné par la sphère des étoiles fixes.

Copernic ne sera toutefois pas compris ni lu de son vivant. Plusieurs décennies s'écoulent avant que de nouvelles failles lézardent l'édifice aristotélicien. En 1572, une étoile nouvelle est observée par le Danois Tycho Brahe (1546-1601), qui démontre qu'elle est située dans les régions célestes lointaines, jusqu'alors présumées immuables (mise en cause de l'hypothèse 6). Tycho Brahe observe les trajectoires des comètes, démontre que ces corps ne sont pas atmosphériques (hypothèse 8), et que leurs trajectoires traversent les orbés planétaires, qui ne peuvent donc pas être solides (hypothèse 3). Cependant, Tycho Brahe ne remet pas en cause le géocentrisme, et refuse donc la théorie copernicienne. Il fait bâtir le premier observatoire européen et accumule pendant trente ans les meilleures observations sur le mouvement des planètes.

Johannes Kepler (1571-1630) est le grand artisan de la révolution astronomique. Il est un fervent partisan de l'héliocentrisme copernicien. Utilisant les données de Tycho Brahe, il découvre la nature elliptique des trajectoires planétaires, et renverse donc l'hypothèse aristotélicienne 2 du mouvement circulaire et uniforme comme explication des mouvements célestes. Il publie ses nouvelles lois dans *L'Astronomie nouvelle* (1609).

La même année 1609 voit les premières observations télescopiques de Galilée, publiées dans *Le Messenger astral*. Les découvertes du relief de la Lune, des satellites de Jupiter, des phases de Vénus, des taches solaires ou de grandes quantités d'étoiles inconnues contredisent toutes les hypothèses 1 à 6. Comme Galilée l'écrit lui-même : « Les preuves irréfutables révélées par cette lunette pulvérisent d'un coup toutes les controverses qui avaient tourmenté les philosophes à travers les âges. »

Notons au passage que l'année 1609 compte deux événements décisifs de l'histoire de l'astronomie, dont le 400^e anniversaire sera célébré en 2009 par l'Année internationale de l'astronomie décrétée par l'Unesco, véritable festival planétaire conçu pour « aider les citoyens du monde à découvrir leur place dans l'Univers ».

On sait que plus tard, Galilée mettra en scène dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632) trois personnages, dont l'un (Simplicio), favorable aux théories d'Aristote, est systématiquement contredit par les faits. Galilée sera condamné par l'Inquisition en juin 1633 et devra abjurer.

L'hypothèse 7 sur la finitude du monde est celle qui résistera le plus ; elle ne sera remise en cause ni par Galilée ni par Kepler, mais par Giordano Bruno (lequel sera brûlé vif en 1600, pour avoir soutenu notamment la pluralité des mondes habités) et par l'astronome anglais Thomas Digges : en 1576, celui-ci est le premier à publier un diagramme cosmologique héliocentrique dans lequel les étoiles sont disséminées à l'infini.

Tous ces travaux ouvrent la voie à une nouvelle vision de l'Univers, construite par Descartes sur la base d'un espace infini. Toutefois ce dernier, apprenant l'issue du procès de Galilée en novembre 1633, renonça à publier de son vivant son propre ouvrage cosmologique (*Traité du monde et de la lumière*). Il décida plutôt de se lancer dans une carrière philosophique, et écrivit successivement le *Discours de la méthode* (1637), les *Méditations métaphysiques* (1641), et les *Principes de la philosophie* (1644), où il critiqua les positions des aristotéliens.

La révolution astronomique est définitivement consommée par Isaac Newton (1642-1727), qui explique la mécanique céleste en termes d'une loi d'attraction universelle, agissant au sein d'un espace infini (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 1687).

Il faut bien voir que cette succession d'idées a révolutionné l'astronomie et la science en général. Surtout, par imprégnation dans les autres domaines de l'activité humaine, elle a conditionné l'éclosion et l'évolution de notre société occidentale moderne.

Dans cette même période, d'autres hypothèses de la physique d'Aristote ayant trait aux mouvements (vitesse de chute des corps proportionnelle à leur poids) ou au vide (« la nature a horreur du vide ») sont également contredites sur des bases expérimentales, notamment par Galilée, Torricelli et Pascal.

Par exemple, en ce qui concerne le mouvement, chez Aristote, chaque corps a une place naturelle dans l'Univers, un lieu : « Tout corps sensible est par nature quelque part, et il y a un lieu pour chaque chose, le même pour le tout et pour la partie, par exemple pour la terre prise en bloc et pour une motte, ou pour le feu et l'étincelle », écrit-il dans sa *Physique*. Le lieu le plus bas est naturellement occupé par la Terre, corps grave et pesant entre tous, et par tous les corps matériels qui sont de même essence : la pierre, le bois, les métaux, etc. Au-dessus de la Terre s'étagent l'eau, l'air, puis le feu, élément léger par excellence, et enfin le cinquième élément, ou

quintessence, qui forme l'éther subtil. Un corps sur lequel aucune force n'agit reste dans son lieu naturel, dans un état de repos absolu. Un corps soumis à des forces l'éloignant de sa place naturelle se meut de façon à regagner sa maison. Quand la force s'arrête, le mouvement s'arrête. Ainsi, une flèche ou un caillou jetés en l'air retombent au sol, car ils cherchent à rejoindre leur maison naturelle qui est au centre de la Terre. Aristote prétend que ces mouvements sont rectilignes : selon lui, la flèche jaillit de l'arc en ligne droite sous l'action de la force imprimée par la corde ; dès que la force cesse d'agir, la flèche retombe en ligne droite. Il déclare en outre que la force est proportionnelle à la vitesse, et que les corps pesants tombent plus vite que les corps légers.

Ces conceptions sur le mouvement des corps ont prévalu au mépris de l'évidence expérimentale : tout le monde peut constater *de visu* qu'une flèche ou une pierre lancée ne suit pas une ligne brisée, mais une trajectoire courbée, qui sera identifiée par Galilée à un arc de parabole. Avec ce dernier, la gravitation fait pour la première fois l'objet d'un examen scientifique. En 1604, il commence ses expériences sur la chute des corps. Faisant rouler des boules le long de plans inclinés afin d'augmenter la durée des chutes, Galilée découvre la propriété essentielle de la gravitation : deux corps quelconques lâchés au même instant parcourent le même espace durant leur chute. Autrement dit, tous les corps sont accélérés de la même façon, quelles que soient leur masse, leur densité ou leur composition chimique. Cette assertion va résolument à l'encontre des écrits d'Aristote, qui stipulent que les objets plus lourds tombent plus rapidement que les plus légers. Dans son *Dialogue sur les deux systèmes du monde* (1632), Galilée écrit ainsi : « Aristote déclare qu'une boule de fer de 100 livres est déjà descendue d'une hauteur de 100 coudées quand une boule de 1 livre a parcouru seulement une coudée. J'affirme que les deux boules arrivent ensemble. Si vous faites l'expérience, vous verrez que l'écart est de deux largeurs de doigts seulement. Vous ne retrouverez pas avec ces deux doigts les 99 coudées d'écart prévues par Aristote. »

La nouvelle physique et ses suites aux XVIII^e et XIX^e siècles auront donc pour effet de rendre caduques la plupart des théories d'Aristote. Pas toutes cependant, et Aristote conserve une certaine actualité dans la physique contemporaine.

Premier exemple : la découverte en 1998 d'une accélération de l'expansion de l'Univers a conduit les physiciens théoriciens à proposer l'existence d'une entité qui imbiberait complètement l'espace, un peu comme le faisait l'éther chez Aristote, ce cinquième élément appelé « quintessence ». Le terme a été repris par les chercheurs pour l'appliquer désormais à ce nouveau champ d'énergie dite « sombre ». Le sujet est capital car le futur de notre Univers tout entier dépend de la vraie nature de l'énergie sombre.

Deuxième exemple : les philosophes et théologiens de toutes les cultures et de toutes les religions ont été confrontés à la question du commencement du temps et de l'origine du monde. Notre arbre généalogique continue-t-il éternellement dans le passé ou prend-il racine à un moment donné ? Aristote défendait l'absence de commencement en invoquant le principe selon lequel rien ne peut surgir de rien. Si l'Univers ne peut naître *ex nihilo*, il doit avoir toujours existé et le temps doit s'étendre indéfiniment dans le passé comme dans le futur.

Les théologiens chrétiens ont défendu le point de vue inverse. Selon eux, Dieu, existant en dehors de l'espace et du temps, les a créés en même temps que les autres aspects du monde. Que faisait Dieu avant ? Il n'y avait tout simplement pas d'avant. La théorie de la relativité générale a conduit les cosmologistes à une conclusion très semblable, bien que fondée sur des arguments autrement rationnels, à savoir l'extrapolation dans le passé des modèles de Big Bang. Toutefois, de nouvelles approches dites de « gravitation quantique » donneraient plutôt raison à Aristote, en faisant disparaître l'idée d'un début du temps ; rien n'empêche alors de concevoir que l'Univers existait avant le Big Bang, ce dernier n'étant plus qu'une transition violente entre deux états de l'Univers.

Troisième exemple : le statut de l'infini en physique. L'infini peut-il se rencontrer dans la Nature et dans la physique qui cherche à la représenter ? Est-il présent dans le monde, dans les choses ? Constitue-t-il une dimension effective et multiple de la réalité ? Ou bien réside-t-il seulement dans notre esprit, fiction nécessaire à la pensée à quoi nulle réalité physique ne saurait correspondre ? Ce dilemme est déjà entièrement explicité par Aristote. Dans sa *Physique*, il considère que les seules entités effectivement données et les seuls processus effectivement exécutables sont finis. Aristote reconnaît cependant à l'infini une nécessité mathématique, à laquelle il peut être nécessaire de recourir dans les démonstrations, sans lui accorder toutefois d'existence réelle : l'infini serait potentiel et non pas actuel. Le sujet est toujours discuté aujourd'hui par les physiciens, les mathématiciens et les philosophes.

On peut enfin apprécier le caractère encyclopédique de la démarche d'Aristote (classifications hiérarchiques du savoir), qui tente de totaliser le savoir et de faire une synthèse entre les cultures philosophique et scientifique, tout en ayant conscience de ce qu'il peut y avoir d'interminable dans la recherche de la « vérité », et que certaines questions d'ordre métaphysique restent ouvertes.

Beauté des polyèdres¹

Les polyèdres sont connus depuis l'Antiquité. Platon a utilisé les cinq réguliers pour décrire les éléments simples (terre, eau, air, feu, éther) en termes de géométrie pure.

De Pacioli aux cosmologistes contemporains, en passant par Kepler, Euler, Lhuilier, Haiiy, les polyèdres, réguliers ou non, parcourent toute l'histoire de la physique. Ils se manifestent dans tous les domaines de la connaissance où prévalent la symétrie et l'esthétique. De nombreux artistes ont dessiné des polyèdres : Piero della Francesca, Léonard de Vinci, Albrecht Dürer, Mauritz Escher, Salvador Dalí, etc. Mais c'est surtout en cosmologie, en cristallographie et en topologie qu'ils ont révélé tout leur potentiel explicatif.

Rappelons la définition élémentaire du polyèdre. C'est une figure de l'espace construite par l'assemblage de faces polygonales, dont les côtés communs forment les arêtes du polyèdre et dont les points communs forment les sommets.

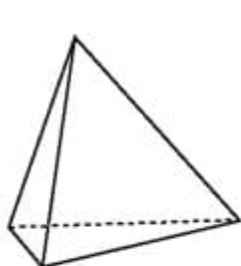
Un cas particulier, qui a joué une importance historique considérable, est celui des polyèdres *réguliers*, c'est-à-dire ceux dont les faces sont des polygones réguliers.

Il n'existe en tout et pour tout que cinq polyèdres réguliers :

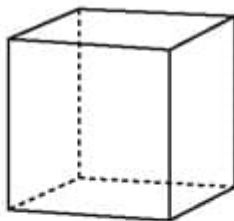
- le tétraèdre, plus communément appelé « pyramide », dont les quatre faces sont des triangles équilatéraux ;
- l'hexaèdre, plus communément appelé « cube », dont les six faces sont des carrés ;
- l'octaèdre, à huit faces triangulaires équilatérales ;
- l'icosaèdre, à vingt faces triangulaires équilatérales ;
- le dodécaèdre, à douze faces pentagonales.

Les cinq polyèdres réguliers sont connus depuis l'Antiquité. Ils forment le couronnement des *Éléments* d'Euclide (III^e siècle av. J.-C.), dont le treizième et dernier livre démontre pourquoi il ne peut exister plus de cinq polyèdres réguliers. Auparavant, ils avaient été étudiés par Théétète et par Platon. Celui-ci, qui avait fait graver au-dessus de la porte de l'Académie l'inscription : « Que nul ne pénètre s'il n'est géomètre », entreprit d'appliquer des principes généraux de symétrie

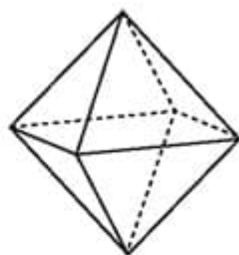
pour décrire l'organisation générale du cosmos, sa forme et son contenu².



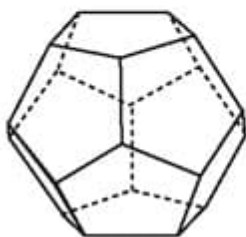
tétrahèdre



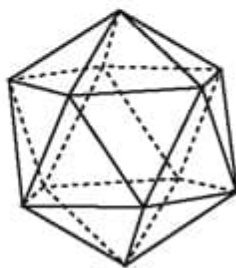
hexaèdre



octaèdre



dodécaèdre



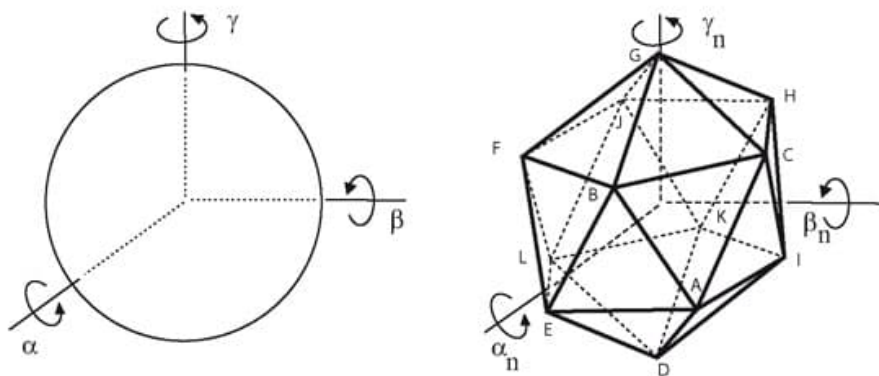
icosaèdre

Les cinq polyèdres réguliers.

Platon avait élu la sphère, figure symétrique par excellence, pour symboliser l'architecture cosmique, supposée refléter la perfection et l'immutabilité divines. Afin de compléter la géométrisation du monde, il voulait représenter les éléments par des figures symétriques. Il choisit les polyèdres réguliers, moins « parfaits » que la sphère, car les éléments sont soumis à la corruption, à l'altération et au changement – d'où le nom de « corps platoniciens » souvent donné aux polyèdres réguliers. La terre est associée au cube, l'eau à l'icosaèdre, l'air à l'octaèdre et le feu au tétraèdre. L'argumentation de Platon ne manque pas de sel. Par exemple, une pierre de forme cubique est plus difficile à mettre en mouvement qu'une pierre ayant toute autre forme polyédrique. Par conséquent, c'est la figure la plus lourde et inerte et, à cet égard, elle doit être associée à l'élément terreux. L'icosaèdre doit être associé à l'eau car, dans la série des polyèdres, c'est celui qui possède le plus grand nombre de faces : à chaque sommet se rencontrent cinq triangles, ce qui fait paraître sa structure relativement ronde et fluide. Le reste est à l'avenant.

Quant au cinquième polyèdre régulier, le dodécaèdre, Platon et

Aristote l'ont utilisé pour clore la représentation géométrique du monde en le mettant en correspondance avec un cinquième élément : la quintessence³. Avec ses douze faces pentagonales, le dodécaèdre est en effet la figure qui se rapproche le plus d'une sphère, dont la parfaite rondeur symbolise la perfection céleste.



Le groupe des rotations continues et discontinues

En géométrie, un objet possède une certaine symétrie si des angles de vue différents en donnent des images indiscernables. Une symétrie est donc une opération mathématique qui laisse une forme globalement invariante.

La sphère (à gauche) est invariante par n'importe quelle rotation d'espace (α, β, γ) autour de son centre, mais un icosaèdre (à droite) doit être tourné selon certaines rotations $(\alpha_n, \beta_n, \gamma_n)$ pour que son aspect extérieur ne change pas. L'icosaèdre fait partie des polyèdres réguliers, figures qui se reproduisent à l'identique sous certaines rotations dont les angles ne peuvent prendre qu'un nombre fini de valeurs.

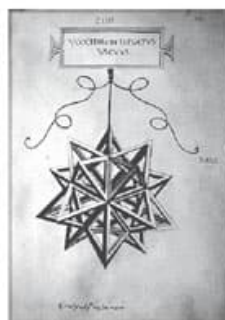
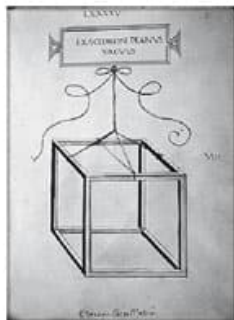
Selon Jamblique, c'est le pythagoricien Hyppase de Métaponte qui aurait construit pour la première fois la figure du dodécaèdre. Dans sa *Vie de Pythagore*, il raconte que le fait d'avoir divulgué par écrit comment on pouvait construire une sphère quasi parfaite à partir de douze pentagones était un tel acte d'impiété qu'il périt en mer. Jamblique ajoute qu'Hyppase s'était vanté d'une découverte dont le mérite revenait au seul maître Pythagore. Ce dernier aurait été intrigué par la forme des cristaux de pyrite que l'on trouve en Sicile, où il vivait. La pyrite présente douze faces pentagonales légèrement irrégulières, et cette forme aurait conduit Pythagore à s'intéresser au nombre d'or, qui se déduit de la construction des polygones réguliers. Dès lors, le dodécaèdre sera chargé d'un lourd symbolisme. Le nombre 5 associé au nombre de côtés de ses faces pentagonales joue un rôle particulier en occultisme : le pentacle ou étoile à cinq branches, à l'intérieur duquel sont inscrits des lettres, des mots et des signes, est censé traduire une structure universelle. Le nombre 12, qui est celui de ses faces, le met naturellement en correspondance avec les douze signes du zodiaque, les douze mois de l'année, les douze apôtres, etc. On a retrouvé des artefacts humains en bronze de forme

dodécaédrique, d'origine gallo-romaine.

Les polyèdres ont joué un rôle important tout au long de l'évolution des « images du monde ». Ils exercent une vive fascination à la Renaissance, comme en témoignent les œuvres d'artistes-géomètres comme Piero della Francesca et Paolo Ucello. Le premier rédige un traité, *De quinque corporibus regularibus* (« Sur les cinq polyèdres réguliers »), dont on attribue les figures à Piero lui-même. *De la divine proportion* (1509) est le dernier ouvrage imprimé de l'humaniste Luca Pacioli, de l'ordre des Frères mineurs, professeur de théologie et mathématicien de renom. Ancien élève de Piero della Francesca, Pacioli demanda à Léonard de Vinci de réaliser les figures de cet ouvrage, où il utilise les polyèdres pour définir les lois de la juste proportion applicables en musique, en architecture, en sculpture, en calligraphie, etc. Son poème liminaire est à cet égard explicite :

« Cinq corps, dans la nature, sont produits,
corps naturels appelés simples,
parce que, à la formation de tout corps composé
ils concourent tous, réunis en un certain ordre.
Ils furent créés nets et purs.
On les nomme les quatre éléments et le ciel ;
ce sont eux dont Platon veut que la représentation
donne l'être à des fruits infinis.
Mais parce que la nature a horreur du vide
Aristote dans [son traité] du ciel et du monde
a voulu les placer, sans les représenter.
Cependant le profond esprit géométrique
de Platon et d'Euclide se plut à en présenter
cinq autres qui s'inscrivent dans la sphère,
corps réguliers et d'aspect agréable,
égaux de côtés et de bases comme on peut les voir,
et jamais on n'en peut former un sixième.
Les corps parlent au lecteur. »

Peu après, Albrecht Dürer, auteur d'un traité de géométrie⁴, réalise sa célèbre gravure *Melancholia*. Cette eau-forte, datée de 1514 d'après le carré latin qui y figure, évoque une rêverie sur la nature du monde selon un état de mélancolie que la vision médiévale associait à l'« humeur noire », à la dépression et à la planète Saturne⁵. Le personnage ailé préfigure de façon troublante l'interrogation créative de Kepler sur l'usage des sphères et des polyèdres pour représenter l'harmonie secrète du monde. Dans le ciel luit un astre que l'on peut identifier à la grande comète de l'hiver 1513-1514. Tendant vers le signe zodiacal de la Balance, elle annonce, sinon la fin des temps, du moins l'achèvement d'un cycle du monde. L'échelle à sept degrés rappelle la croyance des Grecs byzantins selon laquelle l'âge du monde ne dépasserait pas sept mille ans. Le Moyen Âge s'achève, Dürer sera l'un des principaux artisans de la Renaissance.



Illustrations de Léonard de Vinci pour *De la divine proportion* de Luca Pacioli.



Albrecht Dürer : *Melencolia*.

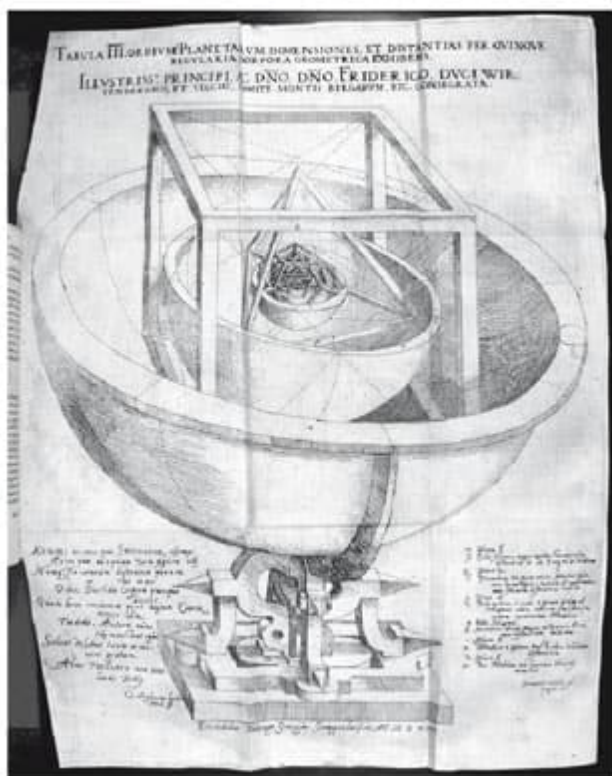
Les polyèdres occupent encore une place prépondérante dans le *Livre de perspective* de Jean Cousin (1560), et dans *Perspectiva corporum regularum* de Wentzel Jamnitzer, imprimé à Nuremberg en 1568. Cet ouvrage est un chef-d'œuvre de l'art géométrique. Les gravures, exécutées par Jost Amman sur des modèles de Jamnitzer, offrent d'étonnantes variantes sur les cinq corps platoniciens et des constructions en forme de polyèdres étoilés que Kepler décrira mathématiquement cinquante ans plus tard, en 1619.

L'intérêt des artistes pour les polyèdres ne s'est jamais démenti au cours de l'histoire (voir [cahier 2](#), [figure 1](#)). Le graveur néerlandais M. C. Escher (dont le frère fut professeur de cristallographie à l'Université de Leyde) en a beaucoup représenté⁶. Salvador Dalí a peint une *Cène* qui se déroule dans une salle de forme dodécaédrique, ceinte de grandes baies vitrées pentagonales (le dodécaèdre symbolisant ici la spiritualité)⁷. L'excentrique peintre catalan a maintes fois déclamé son enthousiasme pour ces figures mythiques : « À vingt ans, en apprenant qu'il n'existait que cinq polyèdres réguliers parfaits pouvant s'inscrire dans une sphère, cinq et pas un de plus, je me suis dit que l'Univers ne pouvait être que limité⁸. »

C'est surtout en cosmologie, en cristallographie et en topologie que les polyèdres ont révélé tout leur potentiel explicatif.

En 1596, dans son *Secret du monde*, Kepler s'est intéressé aux polyèdres réguliers pour résoudre d'une manière originale le problème des rapports entre les orbites planétaires. Selon lui, les cinq solides platoniciens devaient correspondre exactement aux cinq intervalles entre les six planètes connues (Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne). Il a démontré mathématiquement que les solides platoniciens s'agençaient l'un dans l'autre d'une manière unique, selon une architecture reproduisant celle du système solaire. Lorsque, à la suite des nouvelles données astronomiques fournies par Tycho Brahe, Kepler a dû abandonner ce modèle au profit des ellipses pour décrire la forme des orbites planétaires avec une meilleure précision, il n'en a pas perdu sa fascination pour ces figures. Il a étudié de près les polyèdres convexes semi-réguliers, dits archimédiens car étudiés pour la première fois par le géomètre de Syracuse (rhomboïdes, prismes et anti-prismes, etc.). Puis, en abandonnant l'hypothèse de convexité, Kepler a construit les premiers polyèdres « étoilés », constitués d'assemblages d'étoiles multibranches. Dans un merveilleux petit traité de 1610, *La Strena*⁹, il a révélé les formes hexagonales des flocons de neige et a fait le lien avec celles de certains cristaux. Il en a rendu compte par des raisonnements géométriques prémonitoires, en se demandant par exemple comment empiler des solides réguliers de la façon la plus compacte possible. La nature réalise ce type d'empilements : les pépins de grenade, de forme rhomboédrique,

occupent le moins d'espace possible dans le fruit, et les alvéoles d'abeilles ont une forme hexagonale qui permet d'enfermer la plus grande quantité de miel. Mais Kepler a entrevu surtout les principes sous-jacents de symétrie qui président à l'ordonnancement du monde, sur toutes les échelles de grandeur, depuis les cristaux jusqu'aux orbites planétaires et au cosmos tout entier. De tempérament mystique, Kepler croyait que la symétrie géométrique était la langue naturelle avec laquelle Dieu s'était exprimé dans la Création.



Johannes Kepler, *La Coupe cosmique* (1596).

Johannes Kepler a été le premier cristallographe de l'histoire, mais son travail est tombé dans l'oubli. À la fin du XVIII^e siècle, le naturaliste René Just Haüy a laissé choir par mégarde sur le sol de son laboratoire un morceau de calcite – un cristal de forme rhomboédrique. Il s'est étonné de constater que chacun des morceaux gardait lui-même une forme rhomboédrique. Haüy s'est alors demandé ce qu'il obtiendrait en cassant indéfiniment de la calcite. Il a conjecturé qu'à un moment donné il aboutirait à une « plus petite partie » ayant encore la forme de la calcite, une sorte de cellule fondamentale rhombo-édrique (qu'il appela « molécule intégrante ») dont l'assemblage dans l'espace construirait la calcite. Il a tenté

l'expérience et découvrit effectivement le plus petit rhomboèdre en dessous duquel la calcite se décomposait en d'autres corps. Généralisant ce principe à tous les cristaux, il a cherché à déterminer pour chacun d'eux la cellule fondamentale. Il a trouvé six types de structures, caractérisées par leurs symétries spatiales. Il ne restait plus alors qu'à classer les cristaux. La cristallographie était née.

Les polyèdres, réguliers ou pas, ont joué un rôle essentiel dans le développement de la topologie. En 1750, dans une lettre adressée à son confrère Christian Goldbach, Leonhard Euler a cité un certain nombre de propriétés des polyèdres généraux. Parmi elles, une formule d'apparence simplissime, mais qui s'est révélée par la suite d'une profondeur considérable :

$$F - A + S = 2$$

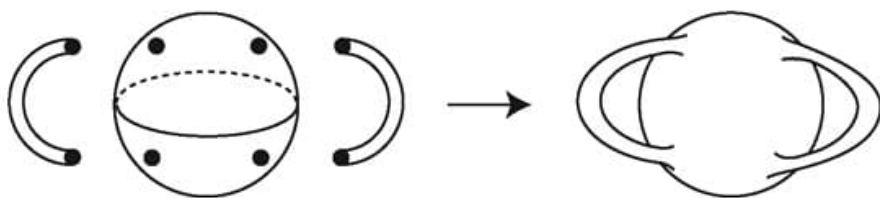
où F est le nombre de faces, A le nombre d'arêtes et S le nombre de sommets du polyèdre.

Par exemple, un cube possède 6 faces, 12 arêtes et 8 sommets. On vérifie sans effort que $6 - 12 + 8 = 2$. Il en va de même avec les autres polyèdres réguliers : le tétraèdre (4, 6, 4), l'octaèdre (8, 12, 6), le dodécaèdre (12, 30, 20) et l'icosaèdre (20, 30, 12). La formule est vérifiée pour n'importe quel type de polyèdre, quelle que soit sa forme ou sa taille ! Euler franchissait ainsi une nouvelle étape dans la libération progressive de la notion de distance en géométrie.

Que se passe-t-il si l'on creuse un ou plusieurs trous dans un polyèdre ? Simon Lhuilier réfléchit à cette étrange question et démontra, en 1813, que la formule d'Euler pouvait être généralisée à n'importe quelle figure polyédrique, percée ou non :

$$F - A + S = 2 - 2T$$

où T est le nombre de trous. Ce nombre apparaît, lui aussi, comme un invariant topologique, indépendant de la taille du polyèdre. Par passage à la limite, il peut être aussi défini pour n'importe quelle surface fermée, et il est alors appelé « genre ». Le genre du tore est 1, celui d'une sphère est 0, celui d'une sphère munie de T poignées est T .



Du polyèdre à la surface.

La formule d'Euler-Lhuilier s'applique à toutes les surfaces fermées de genre T , équivalentes à une sphère munie de T poignées.

Un autre invariant topologique est la dimensionnalité de l'espace. Ce n'est que dans les espaces à trois dimensions que le nombre de

polyèdres réguliers est égal à cinq. Dans le plan bidimensionnel, on peut évidemment construire autant de « polyèdres » (c'est-à-dire de polygones) réguliers que l'on veut, il suffit pour cela d'augmenter le nombre de côtés.

Les mathématiciens, toujours curieux, se sont ingéniés à voir ce que devenaient les polyèdres réguliers dans des espaces de dimension supérieure. Ils ont trouvé par exemple que, dans un espace de dimension 4, on peut construire six polyèdres réguliers ; l'un d'entre eux, appelé « hypercube », est une figure solide délimitée par huit cubes, de la même manière qu'un cube dans l'espace ordinaire est délimité par six faces carrées. Dans son tableau de la *Crucifixion*, Salvador Dalí a représenté un hypercube.

En dimension 5, on peut imaginer l'ultracube, délimité cette fois par un hypercube sur chacune de ses dix faces ! Mais le géomètre le plus talentueux vivant dans un univers à cinq dimensions ne pourrait jamais assembler plus de trois polyèdres réguliers : l'icosaèdre et le dodécaèdre n'ont aucun équivalent dans l'espace à cinq dimensions.

Le nombre de polyèdres réguliers apparaît donc comme une caractéristique de la dimensionnalité de l'espace dans lequel ces polyèdres sont plongés. Certains y voient même une démonstration de la nature tridimensionnelle de notre espace, parce que dans l'espace réel on peut effectivement construire les cinq polyèdres réguliers en pierre, en bois ou en papier.

1- Extrait d'une conférence donnée le 30 avril 2001 à San Leo (Italie) lors du colloque « Beauty in Art and Science ».

2- Tout au long de l'histoire, de nombreux penseurs ont été si imprégnés d'un certain sentiment de la symétrie qu'ils n'ont pu s'empêcher de croire qu'elle tient une place importante dans l'explication du monde : « Le sentiment de la symétrie est un instinct qui repose sur une confiance presque aveugle. C'est l'essence poétique de l'univers, de cet Univers qui, dans la perfection de sa symétrie, est simplement le plus sublime des poèmes » (Edgar Poe, *Eurêka*, 1848).

3- Dans *Epinomis*, un texte postérieur au *Timée*, Platon la nomme *éther*, dont l'étymologie signifie « court toujours », comme les étoiles autour de la Terre.

4- A. Dürer, *Géométrie*, Paris, éd. J. Peiffer-Seuil, « Sources du Savoir », 1995.

5- R. Klibansky, E. Panofsky, F. Saxl, *Saturne et la mélancolie*, Paris, Gallimard, 1989.

6- Lire par exemple B. Ernst, *Le Miroir magique de M. C. Escher*, Paris, Taschen, 1995 ; G.-W. Locher, *Le Monde de M. C. Escher*, Paris, Le Chêne, 1974.

7- Le tableau est exposé à la National Gallery of Art de Washington. On en trouve de nombreuses reproductions sur Internet.

8- S. Dalí, *Dix recettes d'immortalité*, Paris, Audouin et Descharnes, 1973.

9- J. Kepler, *L'Étrenne ou la Neige sexangulaire*, Paris, Vrin, 1975.

Bruno et Galilée au regard de l'infini¹

« Qui est là ? Ah très bien : faites entrer l'infini. »

Louis ARAGON,
Une vague de rêves (1924).

Les cosmologies antiques

Une des questions les plus anciennes à propos de l'Univers est de savoir quelle est son étendue. Est-il fini ou infini ? Il va de soi que la question n'est pas seulement d'ordre scientifique, mais qu'elle a suscité nombre de débats philosophiques et théologiques. Selon les époques et les cultures, la réponse a oscillé, telle une valse hésitante, entre ces deux visions radicalement opposées du monde. On ne peut analyser les positions respectives de Giordano Bruno et de Galileo Galilei face à cette question sans remonter aux sources mêmes de la pensée cosmologique occidentale.

Dès le VI^e siècle avant notre ère, dans la Grèce antique, les premières écoles de savants et de philosophes, dites « présocratiques », tentent chacune à leur façon d'expliquer rationnellement le « monde », c'est-à-dire l'ensemble formé par la Terre et les astres conçu comme un système organisé. Pour Anaximandre, de l'école de Milet, le monde matériel où se déroulent les phénomènes accessibles à nos investigations est nécessairement fini. Il est toutefois plongé dans un milieu qui l'englobe, l'*apeiron*, correspondant à ce que nous considérons aujourd'hui comme l'espace. Ce terme signifie à la fois infini (illimité et éternel) et indéfini (indéterminé). Pour son contemporain Thalès, le milieu universel est constitué d'eau et le monde est une bulle hémisphérique flottant au sein de cette masse liquide infinie. On retrouve cette conception intuitive d'un monde matériel fini baignant dans un espace-réceptacle infini chez d'autres penseurs : Héraclite, Empédocle, les stoïciens notamment, qui ajoutent l'idée d'un monde en pulsation, passant par des phases de déflagrations et d'explosions périodiques.

L'atomisme, fondé au V^e siècle par Leucippe et Démocrite, prône une tout autre version de l'infini cosmique. Il soutient que l'Univers est construit à partir de deux éléments primordiaux : les atomes et le vide. Indivisibles et insécables (*atomos* signifie « qui ne peut être divisé »), les atomes existent de toute éternité, ne différant que par leur taille et leur forme. Ils sont en nombre infini. Tous les corps résultent de la coalescence d'atomes en mouvement ; le nombre de combinaisons étant infini, il en découle que les corps célestes sont eux-mêmes en nombre infini : c'est la thèse de la pluralité des mondes. La formation des mondes se produit dans un réceptacle sans bornes : le vide (*kenon*). Cet « espace » n'a d'autre propriété que d'être infini, de sorte que la matière n'influe pas sur lui : il est absolu, donné *a priori*.

La philosophie atomiste est fermement critiquée par Socrate, Platon et Aristote. De plus, en affirmant que l'Univers n'est pas gouverné par les dieux, mais par de la matière élémentaire et du vide, elle entre inévitablement en conflit avec les autorités religieuses. Au IV^e siècle avant notre ère, Anaxagore de Clazomènes est le premier savant de l'histoire à être accusé d'impiété – en quelque sorte le malheureux précurseur de Bruno et Galilée ; toutefois, défendu par des amis puissants (Périclès), il est acquitté et peut s'enfuir loin de l'hostilité d'Athènes. Grâce à ses deux plus illustres porte-parole, Épicure (341-270 av. J.-C.) – qui fonde la première école admettant des femmes pour étudiantes –, et Lucrèce (I^{er} siècle av. J.-C.), auteur d'un magnifique poème cosmologique, *De la nature des choses*, l'atomisme n'en demeure pas moins florissant jusqu'à l'avènement du christianisme.

Parménide, au V^e siècle avant notre ère, est peut-être le premier représentant du finitisme cosmologique. Selon lui, le monde, image de l'être parfait, est pareil à une « balle bien ronde » et possède nécessairement des limites. Dans le *Timée*, Platon (428-347) introduit un terme spécifique, *khora*, pour désigner l'étendue ou espace en tant que réceptacle de la matière, et défini par elle. Il le considère comme fini, clos par une sphère ultime contenant les étoiles. De la même façon, Aristote (384-322) prône une Terre fixe au centre d'un monde fini, circonscrit par la sphère qui contient tous les corps de l'Univers. Cette sphère extérieure n'est « nulle part », puisque au-delà il n'y a rien, ni vide ni étendue.

Il existe ainsi, dans l'Antiquité grecque, trois grandes écoles de pensée cosmologique. L'une, qui rassemble les milésiens, les stoïciens, etc., fait la distinction entre le monde physique (l'univers matériel) et l'espace : l'univers est considéré comme un îlot de matière fini plongé dans un espace extra-cosmique infini et sans propriété, qui l'englobe et le contient. Les deux autres, atomiste et aristotélicienne, considèrent

que l'existence même de l'espace découle de l'existence des corps ; le monde physique et l'espace coïncident ; ils sont infinis pour les atomistes, finis pour les aristotéliens.

Les premiers théologiens du christianisme ne s'y trompent pas : ils rejettent violemment la philosophie atomiste, qui est matérialiste, mais aussi la doctrine aristotélienne, qui implique un temps éternel et un univers non créé. Les modèles cosmologiques du haut Moyen Âge reviennent aux conceptions archaïques des milésiens, à savoir un cosmos fini baignant dans le vide, à la distinction près que le cosmos revêt maintenant la forme d'un tabernacle, ou celle d'un cœur !

La cosmologie d'Aristote, perfectionnée par l'astronomie de Claude Ptolémée (vers 150 de l'ère chrétienne), est toutefois réintroduite en Occident au XI^e siècle, grâce aux traductions et aux commentaires arabes, et aménagée pour satisfaire aux exigences des théologiens. Notamment, ce qui se situe au-delà de la dernière sphère matérielle du monde acquiert le statut d'espace, sinon physique, du moins éthéré ou spirituel. Baptisé « Empyrée », il est considéré comme le lieu de résidence de Dieu, des anges et des saints. Ce cosmos médiéval aristotélo-chrétien, si bien illustré par *La Divine Comédie* de Dante, est non seulement fini et centré sur la Terre fixe, mais il est très petit : la distance de la Terre à la sphère des étoiles fixes est estimée à 20 000 rayons terrestres, de sorte que le paradis, à sa frontière, est raisonnablement accessible aux âmes des défunts. Le chrétien trouve naturellement sa place au centre de cette construction.

Si ce modèle d'univers s'impose rapidement, il n'empêche pas la résurgence d'idées atomistes. Après la redécouverte du manuscrit de Lucrèce, le cardinal allemand Nicolas de Cues (1401-1464) plaide en faveur de l'infinité de l'Univers, de la pluralité des mondes habités et du mouvement de la Terre dans son *Traité de la docte ignorance* (vers 1440). Mais son argumentation reste principalement métaphysique : l'Univers est infini parce qu'il est l'œuvre de Dieu, lequel ne saurait être limité dans ses œuvres.

Un siècle plus tard, le chanoine polonais Nicolas Copernic (1473-1543) réintroduit l'héliocentrisme, vieille hypothèse déjà formulée au III^e siècle avant notre ère par Aristarque de Samos mais restée en sommeil, malgré la tentative de Nicolas de Cues. Son *De Revolutionibus* (1543) pose les hypothèses que la Terre n'est pas le centre de l'Univers ; que toutes les sphères tournent autour du Soleil, centre de l'Univers ; que tout mouvement céleste est produit par le mouvement de la Terre et non par celui du firmament ; que la Terre effectue une rotation complète autour de ses pôles en un jour et une révolution complète autour du Soleil dans le plan de l'écliptique en une année.

Copernic conserve toutefois la conception aristotélienne d'un

univers fini, enclos à l'intérieur de la sphère des étoiles fixes. Il le déclare seulement immense, et renvoie la balle aux philosophes. Néanmoins, l'héliocentrisme porte en germe une révolution fondamentale : tant que l'Univers était en rotation autour de la Terre fixe, il était difficile d'imaginer qu'il puisse être infini. La difficulté disparaît dès qu'il est reconnu que le mouvement apparent du ciel est dû au mouvement terrestre. En outre, Copernic élargit le monde médiéval. Son modèle est deux mille fois plus grand que celui de Ptolémée : il constitue un tout petit pas vers l'infini, mais en est encore loin...

En 1572, une « étoile nouvelle² » observée par l'astronome danois Tycho Brahe (1546-1601) fournit un premier élément observationnel propre à accélérer la chute de la cosmologie aristotélicienne. C'est en effet dans la sphère des étoiles fixes qu'elle apparaît, c'est-à-dire dans le Monde *supra*-lunaire jusqu'alors réputé immuable.

Dès 1576, Thomas Digges, l'un des plus habiles observateurs de son temps et leader des coperniciens anglais, démantèle la sphère des fixes et en éparpille les étoiles dans l'espace infini. Son manifeste, *A Perfit Description of the Caelestial Orbes* (1576), contient un schéma héliocentrique montrant explicitement, pour la première fois dans l'histoire, des étoiles non plus fixées sur une couche mince, à la surface de la dernière sphère du monde, mais disséminées à l'infini. Ce nouveau modèle fait brutalement passer du monde clos des Anciens à un univers, sinon infini, du moins extrêmement vaste, peuplé d'étoiles innombrables qui sont autant de soleils. Toutefois, Digges ne propose pas de conception véritablement physique de l'espace infini. Pour lui, le ciel et ses étoiles constituent toujours l'Empyrée, la demeure de Dieu, et, à ce titre, n'appartiennent pas vraiment à notre monde sensible.

Giordano Bruno ou l'ivresse de l'infini

La vraie rupture épistémologique est déclenchée par deux philosophes italiens. En 1587, Francesco Patrizi (1529-1597) fait paraître *De l'espace physique et mathématique³*, où il émet l'idée révolutionnaire que le véritable objet de la géométrie est l'espace en tant que tel, et non les figures, comme on le considérait depuis Euclide. Patrizi inaugure un nouveau concept d'espace physique homogène et infini, obéissant à des lois mathématiques – donc accessible à l'entendement.

Mais c'est surtout à son contemporain Giordano Bruno (1548-1600) que doit être attribuée la paternité de la cosmologie infinitiste. « Voici alors apparaître l'homme qui a franchi les airs, traversé le ciel, parcouru les étoiles, outrepassé les limites du monde,

dissipé les murailles imaginaires des sphères – du premier, du huitième, du neuvième, du dixième rang ou davantage – postulées par de vains calculs mathématiques ou par une aveugle et vulgaire philosophie. [...] C'est lui qui, avec les clefs de sa compétence, a ouvert par ses recherches ceux des cloîtres de la vérité auxquels nous ne pouvons avoir accès. Il a mis à nu la nature, que des voiles enveloppaient ; il a donné des yeux aux taupes et rendu la lumière aux aveugles. [...] Nous le savons : il n'y a qu'un ciel, une immense région éthérée où les magnifiques foyers lumineux conservent les distances qui les séparent au profit de la vie perpétuelle et de sa répartition. » Ainsi le bouillant Bruno se présente-t-il lui-même dans *Le Souper des Cendres*, publié en 1584.

Il consacre au sujet de nombreux ouvrages. Le livre premier de son *De immenso* est entièrement consacré à une définition logique de l'espace infini. Dans *De l'infini, de l'univers et des mondes*, il critique violemment le système aristotélicien, se fondant en particulier sur le paradoxe de la frontière cosmique pour défendre vigoureusement les idées d'univers infini et de pluralité des mondes habités. Dès le V^e siècle av. J.-C. en effet, le pythagoricien Archytas de Tarente avait énoncé un paradoxe visant à démontrer l'absurdité de l'idée d'une frontière matérielle de l'Univers : si je suis à l'extrémité du ciel, puis-je allonger la main ou tendre un bâton ? Il est absurde de penser que je ne le peux pas ; et si je le peux, ce qui se trouve au-delà est soit un corps, soit l'espace. Je peux donc aller au-delà de cela encore, et ainsi de suite. Et s'il y a toujours un nouvel espace vers lequel il m'est possible de tendre la main, cela implique clairement une extension sans limite... Il y a donc paradoxe : si l'Univers est fini, il a un bord, mais ce bord peut être indéfiniment dépassé.

L'argument connaîtra une fortune considérable dans tous les débats sur l'extension de l'espace ; les atomistes, tel Lucrèce qui donne l'image d'une lance jetée depuis le bord de l'Univers, et, par la suite, tous les partisans d'un univers infini comme Nicolas de Cuse et Giordano Bruno, reprennent le raisonnement. Il faudra attendre le développement des géométries non euclidiennes, au XIX^e siècle, pour résoudre logiquement le paradoxe. Ces géométries permettent de concevoir des espaces tridimensionnels finis mais sans bord, tout comme, à deux dimensions, la surface d'une sphère.

Revenons au Nolain. Mêlant sa foi et son imagination enthousiaste, Bruno considère le monde infini à l'image de la divinité. « Pourquoi voudrions-nous ou devrions-nous penser que l'efficacité divine soit oisive⁴ ? » Il n'y a qu'un ciel, une immense région éthérée où brillent de magnifiques foyers lumineux qui sont autant de soleils. Nous sommes conduits à découvrir l'effet infini de la cause infinie : Dieu aux pouvoirs infinis ne pouvait créer qu'un univers infini. La

plénitude divine triomphe enfin, brisant les limites du système médiéval ; à l'inverse de Platon et d'Aristote, Bruno valorise l'infini et le monde, ce dernier étant parfait justement parce qu'il est infini, et non pas fini.

Le cheminement de sa pensée vers l'infini part de la constatation que ce que l'on observe est toujours relatif : l'horizon n'est qu'un bord apparent qui se déplace avec l'observateur. Par des arguments étonnamment modernes, Bruno réfute l'opinion commune selon laquelle les étoiles seraient toutes à la même distance de la Terre, comme clouées et fixées sur une ultime sphère. Laisant éclater tout son lyrisme, il déclare : « C'est donc vers l'air que je déploie mes ailes confiantes, ne craignant nul obstacle, ni de cristal, ni de verre, je fends les cieux, et je m'érige à l'infini. Et tandis que de ce globe je m'élève vers d'autres globes et pénètre au-delà par le champ éthéré, je laisse derrière moi ce que d'autres voient de loin⁵. »

Bruno argumente sur des bases physiques et non plus exclusivement théologiques, prêchant sa doctrine dans toute l'Europe. Sa pensée cosmologique s'inspire de l'atomisme de Lucrèce, des raisonnements de Nicolas de Cues et de la thèse de Copernic. De ce dernier, Bruno retient l'héliocentrisme et l'ordonnement du système solaire. Mais il rejette son finitisme cosmologique enclos dans la sphère des étoiles fixes. Précurseur de Kepler et de Newton, Bruno rejette également le culte esthétique de la sphéricité et du mouvement circulaire uniforme.

Dès lors, il n'y a pas de fins, termes, limites ni murailles qui puissent entraver et arrêter l'abondance infinie des choses. Penser la pluralité des mondes pose cependant quelques soucis à la pensée théologique chrétienne. S'il existe plusieurs mondes habités, combien de fois l'Incarnation a-t-elle dû se réaliser ? Une seule fois ? La Terre serait alors dans une position exceptionnelle : exorbitant privilège, si l'on considère l'aspect positif de la réincarnation divine ; ou, au contraire, effroyable défaveur, car ce serait l'unique lieu où aurait été commis le péché originel. Si, en revanche, l'Incarnation s'est réalisée plusieurs fois, elle devient banale par sa répétitivité, et ce n'est alors plus un miracle, lequel est unique, par définition.

La véritable révolution cosmologique du XVI^e siècle ne réside pas dans l'affirmation héliocentrique de Copernic, mais dans celle de la multiplicité infinie des mondes. Bruno finit sur le bûcher le 17 février 1600, place des Fleurs, à Rome. Durant son incarcération à Rome, il n'avait eu de cesse d'enseigner à ses compagnons de cellule que tous ces points lumineux que nous appelons étoiles et qu'ils devinaient à travers l'étroite fenêtre de leur cachot formaient des mondes pareils au nôtre.

Galilée ou la prudence du fini

Malgré la force de ses convictions, Giordano Bruno n'aura de son temps guère d'influence scientifique. Aucune observation astronomique n'étaye ses conceptions, opposées à la doctrine chrétienne. Sa pensée, trahie et défigurée, reste incomprise de la plupart de ses contemporains – notamment par Galilée. Il sera redécouvert par les philosophes des Lumières au XVIII^e siècle, et son image légendaire naîtra seulement au milieu du siècle suivant, lorsque la science positiviste s'opposera triomphalement à l'Église.

En Angleterre cependant, patrie de Thomas Digges et davantage dégagée des oppositions dogmatiques des autorités religieuses, William Gilbert et Henry More défendent à leur tour les notions d'héliocentrisme et de pluralité des mondes. Dans son *De Magnete* (1600), Gilbert prouve non seulement que la Terre se comporte comme un aimant, mais il affirme que les étoiles sont, comme les planètes, à des distances inégales de la Terre, et que le Soleil dirige les planètes à l'aide de forces magnétiques. Chef de file de l'école des néoplatoniciens de Cambridge, le philosophe Henry More (1614-1687) emboîte le pas à Giordano Bruno et prépare le terrain pour la conception d'un espace absolu et infini, que parachèvera son compatriote Newton. More consacre ainsi à l'atomisme et au concept de la pluralité des mondes un ouvrage exalté, *Essai sur l'infinité des mondes* (1646).

Les deux principaux artisans de la « nouvelle astronomie », Johannes Kepler (1571-1630) et Galilée (1564-1642), restent quant à eux très prudents sur la question de l'infini. Kepler tente en premier lieu de construire un modèle d'univers copernicien, mais fondé sur l'usage de figures géométriques particulières : les polyèdres réguliers (*Le Secret du monde*, 1596). Il échoue dans cette tentative, l'agencement calculé des orbites planétaires ne correspondant pas aux nouvelles données expérimentales rassemblées par Tycho Brahe. Découvrant alors la nature elliptique des trajectoires planétaires (*Astronomie nouvelle*, 1609), Kepler renverse le dogme du mouvement circulaire et uniforme comme explication ultime des mouvements célestes. Il refuse cependant de suivre Bruno dans son argumentation sur l'infinité de l'Univers. Il considère cette notion comme purement métaphysique et, puisque non fondée sur l'expérience, dénuée de signification scientifique : « En vérité, un corps infini ne peut être compris par la pensée. En effet, les concepts de l'esprit au sujet de l'infini se réfèrent ou bien à la signification du mot “infini”, ou bien à quelque chose qui excède toute mesure numérique, visuelle ou tactile concevable ; c'est-à-dire à quelque chose qui n'est pas infini en acte, vu qu'une mesure infinie n'est pas concevable⁶. » Kepler appuie son

argumentation en énonçant pour la première fois⁷ un raisonnement qui fera beaucoup gloser : le « paradoxe de la nuit noire ». À première vue, il n'y a pas lieu de s'étonner que la nuit soit noire. Le Soleil couché ne délivre plus de lumière, seules restent les étoiles pour éclairer faiblement la nuit. Supposons cependant que l'espace soit infini, et uniformément rempli d'astres (étoiles, galaxies). En quelque direction que nous regardions, nous devrions trouver un astre plus ou moins éloigné sur notre ligne de visée. L'addition de leurs luminosités devrait rendre le ciel nocturne aussi brillant qu'en plein midi, et même davantage : le fond du ciel ressemblerait à une voûte radieuse continûment tapissée d'étoiles, à la façon d'un gigantesque soleil. Pourquoi n'en est-il pas ainsi ? S'il existe d'autres étoiles de même nature que la nôtre, comment se fait-il qu'à elles toutes elles ne dépassent pas notre Soleil en éclat ? C'est le paradoxe de la nuit noire. Pour bien le saisir, assimilons l'Univers à une forêt et les étoiles à des troncs d'arbres identiques, largement espacés. Les troncs les plus proches paraissent les plus gros, les troncs plus lointains sont plus petits ; mais il est clair que, si la forêt est suffisamment grande, les troncs se chevauchent pour former un fond continu, semblant nous entourer d'un mur circulaire.

Le paradoxe de la nuit noire fait apparemment obstacle au concept d'espace homogène et infini. Comme Kepler ne partage pas la conception de Giordano Bruno, selon laquelle le Soleil est un monde comme les autres, au milieu des étoiles dispersées à l'infini, il répond au paradoxe en optant pour un modèle d'univers fini, borné par un mur ou une voûte. En ce cas, les étoiles sont en trop petit nombre pour couvrir le ciel entier, et il n'y a plus aucune raison pour que le fond du ciel soit brillant. Bien que cette explication se heurte au paradoxe du bord, Kepler y voit la seule issue possible pour expliquer la noirceur nocturne. Tout comme le paradoxe du bord, ce problème ne sera résolu de façon satisfaisante qu'au milieu du XIX^e siècle, mais par de tout autres arguments⁸.

Influencé sans vouloir l'admettre par *Le Secret du monde* de Kepler, Galilée se révèle très vite un fervent partisan du système héliocentrique proposé par Copernic, selon lequel la Terre, une planète parmi les autres, tourne autour du Soleil et non l'inverse. Mais comment le prouver ?

Ayant appris en 1609 l'existence d'un instrument optique permettant de grossir ce que l'on regarde, Galilée s'empresse de le reproduire en l'améliorant, puis pointe cette lunette vers le ciel. Un an après, il expose les résultats de ses observations dans *Le Messager céleste*. Ils sont tous en contradiction avec les dogmes de la physique aristotélicienne, sur lesquels reposait l'astronomie d'alors. Qu'on en

juge. La Lune, constellée de cratères, de montagnes et de vallées, n'a pas la circularité parfaite qu'on lui attribuait, mais elle a du relief, tout comme la Terre. Le Soleil, couvert de taches, est également imparfait. Vénus a des phases. Jupiter tourne autour du Soleil en entraînant un système de quatre satellites. Les étoiles sont innombrables. La Voie lactée est constituée d'une multitude d'étoiles très peu lumineuses qui lui donnent cette blancheur laiteuse. « Grâce à la Lunette, écrit Galilée, on peut si bien fixer son regard sur la Voie lactée que toutes les disputes qui ont, durant tant de siècles, torturé les Philosophes sont détruites par l'évidence de la perception, et que nous voilà libérés de discussions verbeuses. La Galaxie n'est, en effet, rien d'autre qu'un amas d'Étoiles innombrables regroupées en petits tas. » Il mentionne aussi les nébuleuses, « troupeaux de petites étoiles semées de manière admirable ».

Sur le plan du style même, l'opuscule de Galilée est novateur : ce récit en langue simple, bref, haletant même, racontant au jour le jour la succession de découvertes bouleversantes à la façon d'une narration journalistique, n'a rien à voir avec un traité scientifique classique. Galilée conservera toute sa vie son style savoureux et polémique. « Ses dons littéraires hors du commun lui permettent de parler aux hommes cultivés de son époque une langue si claire et si frappante qu'il parvient à dépasser la pensée anthropocentrique et mythique de ses contemporains et à ramener ceux-ci à une conception objective, causale, du cosmos, que l'humanité avait perdue après l'apogée de la culture grecque », déclarera Einstein en 1953.

Sur le fond, les implications des observations galiléennes dépassent de loin le constat astronomique. Pour la première fois dans l'histoire de l'astronomie, Galilée a vu, grâce à un moyen d'observation artificiel, une série de phénomènes entrant directement en contradiction avec la physique officielle. Malgré les problèmes épistémologiques que la lunette ne manque pas de poser, à une époque où un seul homme, Kepler et non pas Galilée, était en mesure de comprendre le fonctionnement de cet instrument, *Le Messager céleste* fait grand bruit. Galilée, professeur à l'Université de Padoue, alors inconnu hors de son milieu professionnel, devient le philosophe naturaliste le plus célèbre d'Europe.

Il s'engage alors résolument dans une lutte orageuse pour la reconnaissance du système copernicien, et entend prouver expérimentalement l'identité de nature entre les mondes sublunaire et supralunaire, que la doctrine aristotélo-chrétienne considérait comme foncièrement distincts. Autrement dit, il veut unifier la physique terrestre et la physique céleste, il veut établir l'universalité du monde et des lois qui le gouvernent, et fonder ainsi la physique.

Mais sur la question de l'infini spatial, Galilée, tout comme

Kepler, adopte l'attitude prudente du physicien : « Qu'allons-nous faire maintenant, signor Simplicio, des étoiles fixes ? Allons-nous les disperser dans les immenses abîmes de l'univers à différentes distances de n'importe quel point déterminé, ou bien allons-nous les situer sur une même surface sphériquement étendue autour de son centre, toutes étant alors à distance égale de ce centre⁹ ? » Et il conclut : « Ne savez-vous pas qu'il est encore non décidé (et je crois que cela le restera toujours pour la science humaine) si l'Univers est fini ou infini¹⁰ ? »

La répugnance envers l'infini dont fait preuve Galilée se retrouve dans sa conception du rôle des mathématiques pour l'étude de la nature : « La philosophie est écrite dans ce vaste livre qui constamment se tient ouvert devant nos yeux (je veux dire l'univers), et on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont les triangles, les cercles et autres figures géométriques, sans lesquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot, sans lesquels on erre vraiment en un labyrinthe obscur¹¹. » La vie intellectuelle de Galilée restera du début à la fin imprégnée d'une telle conception de la philosophie naturelle, qui mêle l'expérimentation et la conceptualisation. Or, Galilée s'est intéressé à la suite des carrés n^2 des nombres entiers n , et a remarqué (comme bien d'autres mathématiciens l'avaient fait avant lui) qu'à chaque entier 1, 2, 3, 4, etc., on peut associer son carré 1, 4, 9, 16, etc. Les deux ensembles sont infinis, ils peuvent être mis en correspondance terme à terme, autrement dit ils ont le même nombre d'éléments. Pourtant, l'ensemble des carrés n'est qu'une partie de l'ensemble des entiers, si bien que la correspondance viole l'axiome « le tout est plus grand que la partie ». Ce paradoxe, dit « de la réflexivité », a pendant des siècles échaudé les mathématiciens, au point de les rendre extrêmement prudents dans l'utilisation des infinis, certains jugeant même dangereux, sinon scandaleux, de les invoquer autrement que comme une pure fiction nécessaire à la pensée. Ainsi a-t-on longtemps préféré croire que seul un être infini lui-même – Dieu, pour ne pas le nommer – pouvait penser l'infini. L'Église s'est d'ailleurs opposée à toute tentative de penser l'infini. Thomas d'Aquin considérerait par exemple que quiconque tentait de concevoir l'infini commettait un abominable péché d'orgueil, car il entraînait en concurrence avec la nature unique et absolument infinie de Dieu. On trouve là l'un des arguments avancés par l'Inquisition pour condamner Giordano Bruno.

Bien que finitiste, l'œuvre cosmologique de Galilée inspire des craintes aux théologiens. En 1615, malgré les réticences de certains cardinaux, le Saint-Office met à l'Index le *De Revolutionibus* de Copernic et met en garde Galilée, qui reprend le chemin de Florence.

Le cardinal Roberto Bellarmin, qui avait décidé en 1600 du sort fatal de Giordano Bruno, exhorte Galilée à ne pas soutenir la doctrine copernicienne. Bellarmin n'interdit toutefois pas à Galilée l'étude du système copernicien en tant qu'hypothèse scientifique. D'autant que Galilée tient absolument à se démarquer de Bruno. Ce dernier interprétait la théorie copernicienne dans un sens purement philosophique ou métaphysique, sans conséquence scientifique précise. Sa philosophie de la nature était dénuée de rigueur ; ses raisonnements fourmillaient d'allégories, de références à la magie, d'affirmations générales invérifiables. Pour Galilée, au contraire, la théorie copernicienne est le point de convergence de toutes les nouvelles recherches scientifiques, et il veut fonder sur elle une nouvelle méthodologie scientifique. C'est pourquoi Galilée ne citera jamais le nom de Bruno – silence blâmé par Kepler, car interprété comme une lâcheté.

Encouragé également par le cardinal Barberini, qui devient pape en 1623 sous le nom d'Urbain VIII, Galilée publie son ouvrage polémique, *L'Essayeur*. En 1632, son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* s'en prend avec virulence à la conception aristotélicienne du monde, et aux théories astronomiques de Ptolémée qui en découlent. Tout comme *Le Banquet des cendres* de Giordano Bruno (qu'il ne cite toujours pas), le *Dialogue* de Galilée met en scène un aristotélicien borné, discutant avec un personnage intelligent qui défend Copernic. Galilée y tire toutes les conséquences des observations effectuées avec sa lunette astronomique : il adopte définitivement le système héliocentrique. Il n'énonce plus d'hypothèses. Il affirme une réalité.

C'est pour cette raison que le tribunal de l'Inquisition le condamne le 22 juin 1633. Urbain VIII se doit en effet de sacrifier un adepte des nouvelles idées afin d'apaiser l'Espagne catholique. Galilée est alors placé en résidence surveillée. Malgré sa rétractation, ses idées se répandent avec son dernier ouvrage, *Discours et démonstrations mathématiques*, paru en Hollande en 1638, quatre ans avant sa mort.

Après Galilée, les systèmes du monde ne seront plus jamais les mêmes. La Terre restera écartée du centre de l'Univers, mais surtout, la remise en cause de la physique d'Aristote exigera de repenser les lois qui régissent le mouvement des corps et de leur donner une formulation mathématique adéquate. La voie est définitivement ouverte à de nouvelles cosmologies, construites sur la base d'un espace infini. Jusqu'alors, la notion d'espace était conçue dans l'ordre cosmologique et physique de la nature, et non pas comme la toile de fond des figures et des constructions géométriques d'Euclide. En d'autres termes, l'espace physique n'était pas mathématisé. Il le devient grâce à René Descartes (1596-1650), qui a l'idée de spécifier

chaque point par un ensemble de trois nombres réels : ses coordonnées. L'introduction d'un système de coordonnées universel qui quadrille entièrement l'espace et permet de mesurer les distances traduit bien que, pour Descartes, l'unification et l'uniformisation de l'Univers dans son contenu physique et dans ses lois géométriques ne font aucun doute. L'espace est une substance au même titre que les corps matériels, un éther infini agité de tourbillons sans nombre, au centre desquels se tiennent les étoiles et leurs systèmes planétaires. Ni la Terre, ni le Soleil, ni aucun astre n'occupent une place privilégiée. Les étoiles sont autant de soleils servant de centre à autant de tourbillons, semblables ou différentes du nôtre.

« Bientôt un nouvel art s'offre à nos travaux.
Aux deux bouts d'un long tube attachant deux cristaux,
Galilée en obtint une force inconnue ;
Son œil perça des cieux l'étonnante étendue.

Ces espaces d'azur, qui semblaient des déserts,
Placés pour séparer tous les astres divers,
D'étoiles tout à coup, à nos yeux se peuplèrent.
De la création les bornes reculèrent.
Chaque instant lui fit voir, dans un lointain sans fond,
Et l'univers plus vaste, et le ciel plus profond. »
(Gudin de la Brunellerie, *L'Astronomie*, 1810.)

1- Article paru en mai 2007 dans la revue *Europe*, n° 937, « Giordano Bruno, Galilée ».

2- Identifiée aujourd'hui à une explosion de supernova.

3- *De spacio physico et mathematico*, présenté et traduit par Hélène Védrine, Paris, Vrin, 1996.

4- *L'Infini, l'univers et les mondes*, Berg international, 1987, p. 66.

5- Exergue de *L'Infini, l'univers et les mondes*.

6- *De stella nova*, 1606.

7- J. Kepler, *Conversation avec le Messager céleste de Galilée*, 1610, trad. I. Panin, Paris, Les Belles Lettres, 1993.

8- Voir par exemple J.-P. Luminet, *L'Univers chiffonné*, op. cit.

9- Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, trad. R. Fréreau, avec le concours de F. De Gandt, Paris, Seuil, 1992, p. 329.

10- Lettre à Ingoli, cité in F. Monnoyeur (dir.), *Infini des philosophes, infini des astronomes*, Paris, Belin, 1995, p. 47.

11- Galilée, *L'Essayeur*, 1623 ; trad. fr. Paris, Les Belles Lettres, 1989.

Newton et l'astronomie au siècle des lumières¹

« L'astronomie, par la dignité de son objet, par la perfection de ses théories, est le plus beau monument de l'esprit humain, le titre le plus noble de son intelligence. »

Pierre Simon DE LAPLACE,
Exposition du système du Monde.

Le siècle des Lumières fut celui des encyclopédistes. L'histoire a glorifié les noms de Diderot, d'Alembert, Rousseau, Voltaire. Mais qu'a-t-elle fait des Cassini, Clairaut, Delisle, Lalande, Euler, Laplace et tant d'autres ? De ces savants de renom, précurseurs dans l'élaboration d'une nouvelle astronomie détachée de la métaphysique et du credo religieux, le public sait peu de choses. Or l'astronomie moderne s'est façonnée à cette époque. Ces aventuriers du savoir ont eu pour seul dieu Newton, pour seule nation la république des sciences, pour seul but porter le flambeau de l'astronomie jusqu'au faite du savoir. Le siècle s'y prêtait : il se déroula tout entier sous le choc des avancées que Newton, Halley et quelques autres savants accomplirent sur la nature de la gravitation et de la lumière, ainsi que sur les meilleurs moyens de la capter.

Les *Principia* de Newton

Isaac Newton (1642-1727) entra à l'Université de Cambridge en 1661 pour y étudier les mathématiques. La peste de Londres le contraignit à une retraite, durant laquelle il forgea ses premiers outils de calcul de mécanique. Quelques décennies auparavant, Kepler avait découvert les lois du mouvement planétaire et suggéré une force d'attraction de type magnétique émanant du Soleil ; Galilée avait publié un système du monde copernicien unifiant les lois de la physique céleste et terrestre.

René Descartes (1596-1650) avait ensuite proposé un modèle d'univers révolutionnaire, qui marquait définitivement la rupture avec

la vision antique d'un monde clos géocentrique, au profit d'un espace infini rempli d'une matière fluide s'organisant en tourbillons. Ni la Terre, ni le Soleil, ni aucune planète n'y occupaient une position privilégiée. Les étoiles étaient autant de soleils servant de centre à autant de tourbillons, semblables ou différents du nôtre.

Toutefois, le jeune Newton se rendit compte que le mouvement de certaines planètes et comètes échappait à l'explication de Descartes. Il fallait une théorie nouvelle. Il comprit que la chute des corps et le mouvement des planètes relevaient d'un même phénomène, et définît la gravitation comme une force d'attraction. En 1666, il fit l'hypothèse que tous les corps massifs s'attirent mutuellement selon une force proportionnelle à leurs masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance.

Newton put ainsi démontrer géométriquement que le mouvement d'une planète selon une ellipse dont le centre de force est placé au foyer solaire implique nécessairement une loi de force inversement proportionnelle au carré de la distance. Pour les besoins de sa démonstration, il inventa une nouvelle branche des mathématiques : le « calcul des fluxions ».

Ce n'est qu'en 1687, sous la pression de l'astronome Edmund Halley (1656-1742), qu'il fit connaître ses résultats dans les *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*). La première édition, tirée à 250 exemplaires, provoqua des polémiques très vives à propos de la paternité du calcul des fluxions, car une méthode similaire nommée « calcul infinitésimal » avait été développée parallèlement par Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716). L'Europe savante fut divisée entre l'Angleterre, qui soutint le calcul des fluxions, et le continent, qui appuya Leibniz.

Un nouveau système du monde

Tout comme celui de Descartes, le système du monde newtonien est d'extension infinie, mais surtout ce monde est soumis à une dynamique particulière, régie par la loi de la gravitation universelle. Une pomme tombe parce qu'elle est attirée par la Terre, tout comme la Lune. De même, toutes les planètes, y compris la Terre, sont attirées par le Soleil et tournent autour de lui selon les trajectoires elliptiques décrites par Kepler.

Expliquant l'organisation et le fonctionnement du système solaire en termes de forces et en vertu d'un système général du monde, Newton ouvrit un nouvel horizon cosmologique. Ses théories furent d'abord difficilement acceptées, surtout sur le continent où la théorie de Descartes garda longtemps la faveur. Pierre Louis Moreau de

Maupertuis (1698-1759) fut le premier scientifique français à choisir ouvertement le camp de Newton. Il pensait qu'il pouvait être bon citoyen sans adopter aveuglément la physique de son pays. Pour promouvoir les idées de Newton, il fit preuve d'un vrai courage d'opinion, relayé brillamment par Voltaire, dont il fut un temps l'ami et l'inspirateur. Dans son mémoire présenté en 1732 à l'Académie, *Sur les lois de l'attraction*, il prouva le désaccord entre la thèse des tourbillons et le mouvement des planètes, et souligna que la théorie de Newton était bien plus simple. Voltaire travailla ensuite à faire admettre les idées newtoniennes auprès de l'élite intellectuelle, les vulgarisant avec brio dans les *Lettres anglaises* (1733), les *Éléments de la philosophie de Newton* (1738) et les *Éléments de physique de Newton* (1741). Plus que toute autre œuvre du siècle des Lumières, les *Éléments* de Voltaire rendirent les idées de la science newtonienne populaires en Europe. Bien que se consacrant principalement à l'optique, Voltaire discuta aussi la théorie gravitationnelle et la cosmologie de Newton. La première traduction en français des *Principia* fut réalisée par la marquise du Châtelet, avec la collaboration d'Alexis Clairaut. Cette édition, parue en 1756 à titre posthume, était accompagnée d'une préface de Voltaire.

Dès lors, la théorie de Descartes fut abandonnée : « Ainsi ces Tourbillons mal assemblés dans leur origine, quoiqu'ils eussent paru faire fortune par leur nouveauté, souvent refondus ensuite ; attaqués d'abord légèrement, puis vivement pressés et ébranlés par toute la force de la raison, leur redoutable ennemie, furent enfin renversés pour jamais, et tombèrent avec fracas. [...] Aux tourbillons succéda l'attraction », put écrire en 1755 le philosophe anglais Benoît Stay.

Les triomphes de la gravitation universelle

La physique newtonienne, semblable à une parfaite horlogerie, permit d'expliquer, prévoir et calculer des phénomènes astronomiques tels que l'aplatissement du globe terrestre, le retour des comètes périodiques, l'amélioration des tables du mouvement de la Lune et du calcul des éclipses, et la mesure de la distance Terre-Soleil grâce aux passages de Vénus. Chacune de ces prédictions fut vérifiée avec succès, consacrant ainsi la suprématie de la théorie newtonienne et l'avènement d'un nouveau système du monde, qui prévalut jusqu'au début du XX^e siècle, lorsqu'il fut remplacé par la théorie relativiste d'Albert Einstein.

La forme de la Terre

Il avait fallu des siècles pour accepter l'idée que la Terre soit ronde. Ce fut un autre tour de force de démontrer qu'elle ne l'était pas

tout à fait. Dans ses *Principia*, Isaac Newton démontra qu'en raison de sa rotation propre, notre planète n'était pas sphérique. Utilisant sa théorie de l'attraction universelle pour calculer la configuration d'équilibre d'une masse homogène tournante, soumise à sa propre gravité combinée avec la force centrifuge, Newton en déduisit que la Terre devait épouser la forme d'un ellipsoïde légèrement aplati aux pôles.

Les astronomes de l'époque n'étaient guère enclins à admettre cette hypothèse sans preuve expérimentale. La « philosophie naturelle » de Newton avait maints adversaires. La controverse n'était pas toujours motivée par des raisonnements scientifiques ; politique et fierté nationale s'y mêlaient aussi. Les « cartésiens » français affirmaient par exemple que l'ellipsoïde terrestre était allongé dans l'autre sens – oblong comme un citron, plutôt qu'aplati comme une mandarine. Ils se fondaient sur des mesures erronées effectuées par l'astronome Cassini, et sur une opposition systématique à la science anglaise ! Mais les savants, malgré leur parti pris, sont toujours prêts à abandonner leurs certitudes devant l'évidence expérimentale. Le dernier mot de l'affaire, donc, revenait aux mesures géodésiques : arpenter en divers lieux du globe terrestre des arcs de méridien et les comparer à l'arc sphérique idéal afin d'en déduire la vraie figure de la Terre.

En 1735, l'Académie des sciences de Paris désigna une mission chargée de mesurer un arc de méridien sur l'équateur même, au sud de Quito. Cette expédition, conduite dans les Andes péruviennes par Louis Godin et Pierre Bouguer, travailla plus de huit ans dans des conditions épouvantables : terrain montagneux, climat défavorable à l'observation astronomique, destruction systématique des signaux géodésiques par les indigènes, difficultés financières, dissensions internes à l'équipe.

Aucune de ces infortunes n'affecta l'expédition de Laponie. Conduite en 1736 sous l'impulsion de Maupertuis au voisinage du cercle polaire, elle se conclut dès 1737 par la confirmation des calculs de Newton. La Terre se trouvait avoir spécifiquement la figure que Newton lui avait donnée, ce que plus tard Voltaire, lorsqu'il se fut brouillé avec son ancien ami Maupertuis, exprima par ces vers facétieux :

« Vous allâtes vérifier en des lieux pleins d'ennui
Ce que Newton trouva sans sortir de chez lui ! »

Les Éclipses au temps des Lumières

« Quelques secondes avant que le Soleil ne fût entièrement caché apparut autour de la Lune un anneau lumineux d'environ un doigt de

large², ou peut-être large d'une dixième partie du diamètre lunaire. Il était d'un blanc pâle, ou plutôt d'une couleur de perle, me paraissant légèrement teinté des couleurs de l'arc-en-ciel, et concentrique avec la Lune. »

C'est en ces termes que l'astronome anglais Edmund Halley (1656-1742) décrivit la couronne solaire lors de l'éclipse totale du 3 mai 1715, en croyant toutefois qu'il apercevait pour la première fois l'atmosphère de la Lune. Cette éclipse solaire ne fut que partiellement visible à Paris.

Le 22 mai 1724 se produisit une nouvelle éclipse solaire, cette fois totale à Paris. Le jeune Louis XV, âgé de 14 ans, la vit. Le trajet de son ombre traversa l'Angleterre, la France et l'Allemagne. Elle fut soigneusement calculée et cartographiée. Les astronomes professionnels l'étudièrent depuis la terrasse du bâtiment principal de l'Observatoire de Paris, récemment construit par Perrault, tandis que des peintres représentèrent les scènes d'observation populaire.

La prédiction précise des temps et lieux de visibilité des éclipses solaires ne pouvait se faire que grâce à une connaissance détaillée du mouvement de la Lune, compte tenu du grand nombre d'irrégularités dont notre satellite naturel est affecté. La première théorie des petites variations lunaires fut donnée par Isaac Newton, dans le cadre de sa loi de la gravitation universelle : puisque tout corps massif exerce une force d'attraction gravitationnelle, le mouvement de la Lune est aussi influencé par toutes les planètes du système solaire. Newton confia un jour que ses recherches sur la Lune avaient été les seules à lui avoir occasionné des maux de tête ! En effet, le calcul des perturbations causées par les autres planètes était hors de portée des mathématiques de son temps. La seconde édition des *Principia*, parue en 1713, n'expliquait que huit inégalités et laissait non résolu un écart résiduel entre la théorie et les observations.

Ce fut l'une des tâches monumentales des astronomes-mathématiciens du XVIII^e siècle que de réduire cet écart. Alexis Clairaut (1713-1765), Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) et Leonhard Euler (1707-1783) furent les artisans principaux du calcul des perturbations. Les deux premiers prirent initialement parti contre la loi de gravitation newtonienne, tandis que le troisième, plus prudent, déclara qu'il serait « désolé de détrôner Newton ». Une intense rivalité se développa entre les trois hommes. Clairaut dut admettre son erreur en 1749 : la loi de gravitation universelle était correcte, mais pour la faire concorder avec les observations du mouvement lunaire, il fallait inclure des termes auparavant négligés. D'Alembert parvint à la même conclusion par des méthodes mathématiques encore plus élégantes. Quant à Euler, nommé entre-temps à l'Académie de Saint-Pétersbourg, sa théorie de la Lune

échouait. Il eut alors la malicieuse idée de créer le prix académique de 1752 pour le meilleur article consacré au mouvement de la Lune. Clairaut tomba dans le piège et envoya son essai, ce qui permit à Euler de découvrir ses erreurs. D'Alembert, quant à lui, s'était méfié : persuadé qu'Euler favoriserait Clairaut pour l'attribution du prix, il ne participa pas au concours et publia son article neuf mois avant tout le monde ! Cette anecdote rappelle combien la pratique scientifique moderne s'est constituée au siècle des Lumières : ces rivalités et autres ruses entre savants de ce temps préfigurent en effet la situation qui prévaut aujourd'hui dans la communauté scientifique.

Dans sa *Théorie de la Lune*, publiée en 1772, Euler définit le mouvement lunaire à partir d'une cinquantaine d'équations, chacune représentant une petite variation. Mais le calcul pratique restait inaccessible. Tout comme Newton, Euler dut reconnaître sa défaite. Il fut toutefois capable de prédire avec une remarquable précision le lieu de totalité de l'éclipse solaire qui, le 25 juillet 1748, traversa l'Europe.

Le retour de la comète

Edmund Halley éclaira le XVIII^e siècle par deux prévisions astronomiques d'une audace intellectuelle sans précédent. Toutes deux fondées sur la mécanique céleste newtonienne, elles étaient toutefois programmées à des dates que son âge ne lui permettait pas d'espérer atteindre (il mourut en 1742). La première était le retour, prévu pour 1759, de la comète qu'il avait observée dans sa jeunesse, en 1682. La seconde était l'opportunité que représentaient les deux passages de Vénus devant le Soleil, prévus pour 1761 et 1769, pour mesurer la parallaxe solaire.

Ni Halley ni les autres membres de la Royal Society ne parvenaient à expliquer le mouvement de la spectaculaire comète de 1682. Selon la suggestion de Cassini, alors directeur de l'Observatoire de Paris, Halley analysa les trajets de vingt-quatre comètes antérieurement observées. Découvrant que celles de 1531 et de 1607 avaient approximativement la même orbite, il les identifia et définit « sa » comète par son orbite elliptique de période égale à 75 ans. Mais comment le prouver mathématiquement ? Il se rendit à Cambridge pour soumettre le problème à Newton. Celui-ci déclara l'avoir résolu depuis 1666. Halley, ébloui, rentra à Londres. Newton, qui avait promis de lui envoyer sa démonstration, se mit aussitôt à la rédaction des *Principia*, qui lui prit moins de deux ans. « La comète rétrograde, qui parut en 1607, décrit un orbe qui s'accorde assez juste, selon les calculs de Halley, avec celui de la comète qui parut en 1682. En supposant que ces deux comètes n'aient été qu'une seule et même, on trouvera que le temps de sa révolution est de 75 ans, que le grand axe

de son orbe est au grand axe de la Terre comme la racine cubique du carré de 75 ou comme 1778 à 100 environ... Tout cela se trouvera prouvé si cette comète revient dans ce même orbe au bout de 75 ans », écrivit Newton dans les *Principia*.

Pour la première fois, une explication rationnelle était donnée à ces vagabondes célestes, dont l'irruption inattendue effrayait jadis les populations. Le calcul précis de la date de retour posait un problème technique. Le trajet d'une comète serait simple si celle-ci n'était soumise qu'à l'attraction du Soleil. Les planètes, en particulier Jupiter, exercent elles aussi leur attraction et perturbent cette trajectoire. Comme mentionné plus haut à propos du mouvement de la Lune, Newton n'avait pas développé suffisamment les techniques mathématiques pour mettre au point le calcul des perturbations. Ce fut la tâche à laquelle s'attelèrent les mathématiciens du milieu du XVIII^e siècle. La comète étant prévue pour 1758, l'Académie des sciences de Paris lança un vaste programme de recherche. Alexis Clairaut, mathématicien, s'associa à un astronome, Jérôme Lalande (1732-1807) et, fait rarissime pour l'époque, à une femme, Nicole-Reine Lepaute (1723-1788), pour effectuer de lourds calculs. En novembre 1758, ils annoncèrent le retour au périhélie de la comète de Halley pour avril 1759. Le jour de Noël 1758, la comète fut signalée par un paysan allemand, et elle passa au périhélie le 12 mars. Ce fut un triomphe extraordinaire, qui vainquit les dernières résistances envers la théorie newtonienne sur le continent.

Les passages de Vénus

En 1663, dans son ouvrage *Optica Promota*, le mathématicien écossais James Gregory (1638-1675) suggéra l'utilisation des transits de Mercure ou de Vénus pour la détermination de la distance du Soleil. La méthode pratique de cette détermination fut mise au point par Edmund Halley, lorsqu'en 1677 il se rendit à l'île de Sainte-Hélène pour observer les étoiles du voisinage du pôle sud ainsi que le transit de Mercure devant le disque du Soleil.

Dans une communication faite en 1716 à la Royal Society, Halley jeta les bases d'une campagne d'observations des futurs transits de Vénus, prévus en 1761 et 1769, démontrant l'opportunité exceptionnelle qu'une telle conjonction représentait pour mesurer une fois pour toutes la distance du Soleil et, par là même, *via* les lois de Kepler, fixer les dimensions du système solaire, inconnues à l'époque.

Il s'agissait pour les astronomes de pointer simultanément la planète depuis différentes stations de la Terre, avec l'avantage considérable que ce pointage se ferait par rapport au disque du Soleil, sur lequel Vénus se détacherait comme un point noir. Vénus, pour

chaque observateur, devait passer devant le Soleil avec un très léger décalage. La mesure de cet angle sur le Soleil, appelé parallaxe, devait permettre, connaissant la distance séparant les observateurs (c'est-à-dire leur latitude et leur longitude terrestres) de calculer précisément la distance Terre-Soleil. C'est en chronométrant scrupuleusement les instants d'entrée et de sortie de la planète que la parallaxe du Soleil pourrait en principe être déterminée.

La réputation de Halley contribua au succès de l'entreprise. Un demi-siècle s'écoula entre la prédiction de Halley et son accomplissement. L'observation des transits de Vénus sur le Soleil n'était pas, en matière d'organisation, une mince affaire. En France, Joseph-Nicolas Delisle (1688-1768) se battit plus de dix ans pour appeler à la mobilisation tous les astronomes du monde. Ambassadeur plénipotentiaire de la république des Sciences, il courut de Paris à Londres et de Vienne à Saint-Petersbourg, en passant par Berlin, afin que les jeunes astronomes soient à l'affût de ce rendez-vous de Vénus et du Soleil. Il préconisa une modification de la méthode expérimentée sans succès lorsque Mercure était passée devant le Soleil en 1753.

Répondant à l'appel, nombre de scientifiques se mobilisèrent pour observer dans les meilleures conditions possibles les transits de 1761 et 1769.

Il s'ensuivit, au cours du XVIII^e siècle, une activité scientifique sans précédent. Pour la première fois fut organisée, sur une base mondiale, avec une préparation sur plusieurs années, une campagne d'observations systématiques d'un phénomène astronomique. Pour la première fois, au même instant, disséminés partout dans le monde, des savants de toutes les nations observèrent le même phénomène céleste et se communiquèrent les résultats de leur travail. Cette folle épopée internationale mit en ébullition l'Europe entière et marqua la naissance, donc, d'une internationale des savants, sachant imposer à leurs monarchies ennemies une vaste coopération, la première du genre, par-delà les rivalités politiques et les enjeux économiques : guerre de Sept Ans, maîtrise des mers, conquête des colonies³.

Le transit du 6 juin 1761 fut observé depuis 62 lieux différents par 120 observateurs ; celui du 3 juin 1769 le fut depuis 63 stations par 138 observateurs. Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande coordonna les observations françaises du transit de 1769. Bénéficiant de l'exactitude des observations du transit de 1761, il calcula et dessina la mappemonde du second passage. La portion du globe terrestre d'où le passage serait entièrement visible comprenait toute la partie ouest de l'Amérique du Nord, le Pacifique, l'extrême nord-est de l'Asie, le nord de la Sibérie, le nord de la Scandinavie et toute la région polaire arctique. Les points où le chronométrage du transit serait le plus intéressant se situaient donc dans les régions les plus délicates à

atteindre, aux confins du cercle polaire arctique et dans le Pacifique Sud, régions largement inconnues. Lalande, sujet au mal de mer, préféra conduire ses propres observations depuis le tout nouvel Observatoire de l'École militaire, dont il était directeur.

Les mesures obtenues durant ces expéditions permirent effectivement de déterminer la valeur de l'unité astronomique (150 000 000 kilomètres), mais s'effectuèrent parfois au prix de véritables drames.

Lalande put ainsi écrire dans son compte rendu publié en 1772 : « Presque toute l'astronomie suppose cette distance connue. La grandeur des orbites de toutes les planètes, la durée des éclipses, la connaissance des volumes, des densités, des diamètres de tous les corps célestes, tiennent à la parallaxe du Soleil, et par conséquent à l'observation du passage de Vénus. »

Lalande dirigea ensuite l'Observatoire de Paris et la revue astronomique *Connaissance des temps* chargée de calculer les éphémérides. Calculateur infailible, à la puissance de travail phénoménale, Lalande fut également un grand vulgarisateur, l'un des premiers, avec Maupertuis, à vouloir être reconnu du grand public et à organiser sa médiatisation.

L'uranométrie au temps des Lumières

Entre 1666 et 1670, Newton chercha une méthode pour supprimer l'aberration chromatique des lunettes astronomiques. Une solution utilisant deux miroirs concaves avait déjà été envisagée en 1663 par James Gregory, mais il n'était pas parvenu à les fabriquer. C'est le Français Jean Cassegrain qui trouva la solution en 1672. S'orientant vers une autre solution, Newton mit au point en 1671 son célèbre télescope à réflexion. Muni de deux miroirs dont un petit plan incliné à 45 degrés placé dans le trajet des rayons lumineux et réfléchissant la lumière sur le côté du télescope, vers l'oculaire, l'instrument supplanta la lunette astronomique et révolutionna les performances de l'observation astronomique. Le XVIII^e siècle vit donc l'élaboration de nouvelles cartes célestes qui permirent à l'uranométrie (art des cartes célestes) de faire un prodigieux bond en avant. Les étapes les plus remarquables furent l'atlas de Flamsteed (1725), le catalogue du ciel austral par La Caille (1752), le premier catalogue de nébuleuses établi par Messier (1784), les observations des nébuleuses et de la Voie lactée par William Herschel, et la découverte capitale de la planète Uranus par le même Herschel (1781), qui agrandit de façon spectaculaire les frontières du système solaire tel qu'on le concevait depuis l'Antiquité.

La réorganisation des constellations connut un important bond en

avant avec l'astronome français Nicolas Louis de Lacaille (1713-1762). Séjournant au cap de Bonne-Espérance entre 1751 et 1754, il y enregistra les positions de plus de neuf mille étoiles et redéfini complètement la représentation du ciel austral. Dans son « Planisphère contenant les constellations célestes », publié en 1763, il ajouta quatorze nouvelles constellations, qu'il baptisa selon l'esprit rationaliste de son temps : Machine pneumatique, Horloge, Octant, Télescope, Réticule, Microscope, Fourneau, Chevalet du peintre, etc. Il divisa également la grande constellation du Navire Argo, introduite par Ptolémée, en trois constellations plus petites, la Carène, la Poupe et les Voiles.

Science, art et société

Au siècle des Lumières, l'engouement pour les sciences devint si grand qu'elles furent l'objet d'une mode à laquelle rien n'échappa. Cette vulgarisation s'adressait aux « gens du monde » généralement oisifs. Le siècle vit fleurir les expériences et les enseignements publics. Les collections de curiosités et d'instruments se multiplièrent. Grands seigneurs et riches bourgeois, hauts fonctionnaires et femmes du monde collectionnèrent les instruments de physique – malgré leur prix de revient exorbitant – avec autant de passion que s'il s'était agi de peintures ou d'œuvres d'art. Ce fut le grand essor des « cabinets » de physique, lieux où de riches collectionneurs exposaient toutes les curiosités qu'ils avaient pu réunir. L'ensemble d'instruments le plus complet fut celui du Roi, au Collège royal. Son inventaire couvrait 16 pages. Il y eut également le cabinet de Nollet et celui du collège de Navarre. Mais le cabinet le plus étonnant fut celui du physicien Jacques-Alexandre-César Charles (1746-1823), qui, en 1792, alla compter jusqu'à 330 pièces rares. Charles donnait un cours très suivi du monde savant, parmi lesquels on comptait Volta, Benjamin Franklin et les membres de l'Académie des sciences. Il se distinguait par une dextérité prodigieuse dans la réalisation d'expériences étonnantes de toutes sortes, aux résultats intenses. Il popularisa notamment les découvertes de Franklin et des frères Montgolfier, et inventa en 1783 le premier aérostat à hydrogène. Louis XV lui permit alors d'installer son cabinet de physique dans la galerie Apollon du Louvre. Parmi ses trésors se trouvaient des instruments d'astronomie tels que télescopes newtoniens et grégoriens, globes terrestres et célestes, sphères armillaires, horloges et planétaires.

Les planétaires étaient des installations qui permettaient de représenter l'ensemble des mouvements des corps célestes composant le système solaire. Tout au long de l'Antiquité et du Moyen Âge, les planétaires figuraient la Terre au centre, géocentrisme oblige. Les

planétaires illustrant le système copernicien, avec le Soleil au centre, ne furent construits qu'à partir du XVIII^e siècle. Une couronne horizontale figurait l'écliptique, avec indication du zodiaque et du calendrier correspondant. Au centre de l'appareil se trouvait le Soleil, figuré par un globe doré. Des engrenages assuraient la rotation de la Terre et de la Lune par rapport au Soleil. En partant du Soleil, des disques en carton figuraient les planètes Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.

Dans leur entreprise de séduction, les sciences voulurent se débarrasser de leur côté rébarbatif pour mettre en valeur leurs aspects les plus spectaculaires. L'abbé Jean Nollet fit de la physique expérimentale un divertissement. Le cours qu'il donna à Paris à partir de 1734 bannit toute formule ou raisonnement mathématique pour ne s'attacher qu'à des démonstrations spectaculaires réalisées à l'aide d'instruments. En 1753, Louis XV fonda pour lui au collège de Navarre un enseignement de physique expérimentale, suivi par 600 auditeurs – séances au cours desquelles les propriétés étranges de l'électricité jouaient le premier rôle, ainsi que le magnétisme, la chimie ou l'anatomie. Bientôt, la seule chaire de Navarre ne suffisant plus à la curiosité d'une multitude d'auditeurs, le Collège royal convertit en 1769 une de ses deux chaires de philosophie grecque et latine – qui n'étaient plus fréquentées – en une chaire de physique expérimentale.

La littérature scientifique se mit, elle aussi, à toucher un public aussi vaste que celui des amateurs de belles-lettres. Les journaux, véhicules de la mode, commencèrent à donner un large écho aux sciences. En 1758, *Le Mercure*, qui auparavant n'ouvrait ses colonnes qu'aux nouvelles politiques et littéraires, diffusa des nouvelles scientifiques à l'occasion du retour attendu de la comète de Halley. L'ouvrage de vulgarisation *Le Spectacle de la nature* (1732), dû à la plume de l'abbé Pluche, fut un véritable *best-seller* vendu à 20 000 exemplaires et traduit en anglais, italien, espagnol, allemand. Les lecteurs étaient des esprits éclairés des deux sexes, aimant aussi bien à philosopher sur le bonheur de l'humanité qu'à étudier les sciences de la nature. C'est surtout par les salons que se répandirent ce savoir neuf et cette nouvelle curiosité pour les phénomènes de la nature. Il devint de bon goût pour une « femme du monde » de rassembler autour d'elle une élite intellectuelle avide de côtoyer artistes et savants. Ainsi, dans des salons réputés comme celui de Julie de Lespinasse, l'élite intellectuelle pouvait-elle écouter le botaniste Buffon, les mathématiciens Clairaut et d'Alembert ou l'astronome Lalande disserter avec des philosophes comme Voltaire et Diderot.

Les sciences vinrent enfin s'immiscer dans le théâtre, la poésie et les arts visuels. Fontenelle écrivit par exemple une pièce de théâtre, *La Comète*, où il raillait les superstitions de l'astrologie. En peinture, le

spectacle de la nature inspira de nombreux artistes comme Joseph Vernet, Jacques de Lajoue ou, en Angleterre, William Hogarth et Joseph Wright. S'il fut un peintre intéressé par les questions scientifiques, technologiques et philosophiques de son époque, ce fut bien Joseph Wright of Derby (1734-1797). Dans sa célèbre toile *Philosophe faisant un exposé sur le planétaire* (1768), il montre des enfants émerveillés réunis autour d'un jeune savant qui, aux côtés d'un autre homme ressemblant à une sorte de pseudo-Newton, fait une démonstration astronomique à l'aide d'un planétaire appelé « Orrery » – le nom venant du comte d'Orrery, mécène qui avait financé son invention. L'instrument était actionné en tournant une manivelle gouvernant un mécanisme d'horlogerie, permettant de mettre en mouvement les planètes placées sur des disques centrés sur le soleil. Dans la toile de Wright, l'astre du jour est représenté par une lampe à huile, permettant une mise en scène plus intense.

L'influence la plus manifeste de la nouvelle astronomie newtonienne sur la peinture se trouve dans une série de toiles exécutée en 1711 par l'artiste italien Donato Creti (1671-1749). Inspiré par les observations astronomiques obtenues à l'aide des nouveaux télescopes de Gregory et Newton, ce dernier peignit huit toiles au format rigoureusement identique de 51 × 35 cm. Elles représentent successivement le astres Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, le Soleil, la Lune et une comète, mais fortement grossis et affublés de tous leurs détails télescopiques.

1- Version non illustrée et légèrement adaptée d'un chapitre de l'ouvrage collectif, *La Lumière au siècle des Lumières et aujourd'hui*, (éd. J.-P. Changeux) Paris, Odile Jacob, 2005.

2- Le doigt écliptique était une unité d'arc égale à la division en 12 du diamètre de l'astre occlus. Pour le Soleil dont le diamètre apparent est de 30 minutes, le doigt représentait donc 2,5 secondes d'arc.

3- J.-P. Luminet, *Le Rendez-vous de Vénus*, 1999, *op. cit.*

Qui est Georges Lemaître¹ ?

J'ai l'honneur et le vif plaisir de débiter cette série d'interventions sur la vie et l'œuvre de Georges Lemaître. Étant le premier orateur et m'adressant à un large auditoire dont une bonne majorité est composée de jeunes étudiantes et étudiants, je suis naturellement chargé de répondre à la question : qui est Georges Lemaître ? À vrai dire une seule phrase suffirait : Georges Lemaître est l'un des tout premiers hommes de science du XX^e siècle, à tout le moins le fondateur de la cosmologie moderne. Disposant d'un quart d'heure, je puis prouver combien cette proposition pèse ses mots à leur juste valeur et, par là même, convaincre ceux qui, ayant en tête d'autres noms apparemment plus brillants au firmament médiatique, trouveraient l'éloge excessif.

Permettez-moi d'abord d'introduire le personnage. Georges Lemaître naît le 17 juillet 1894 à Charleroi. Aîné d'une famille appartenant à la moyenne bourgeoisie, il poursuit son éducation au collège jésuite de Charleroi, et à l'âge de 17 ans il commence des études d'ingénieur à l'Université de Louvain. En 1914, il s'engage volontairement dans l'artillerie belge, et à la fin de la guerre il reçoit l'une des plus hautes distinctions militaires.

À son retour à l'Université, il change d'orientation en passant des études d'ingénierie à celles, beaucoup plus abstraites, des sciences physiques et mathématiques. Il va s'y révéler de première force et, en 1920 il obtient son doctorat de mathématiques avec une thèse intitulée *Sur l'approximation des fonctions de plusieurs variables*. Dès cette époque, Lemaître manifeste l'ouverture d'esprit et la diversité d'intérêts qui le caractériseront par la suite, puisque parallèlement à ses travaux mathématiques de haute volée, il obtient un diplôme de philosophie.

C'est alors que Lemaître décide de rejoindre la prêtrise. Il entre au séminaire de Malines, où il est ordonné prêtre en 1923. En même temps, il prépare, seul, une thèse sur la relativité et sur la gravitation. Il est de toute évidence impressionné par la récente théorie d'Einstein, à cette époque presque inconnue des cercles que Lemaître fréquente.

En juillet 1923, Lemaître obtient une bourse du gouvernement

belge qui lui permet d'étudier à l'étranger. Il passe ainsi une première année à Cambridge, en Angleterre, où il étudie l'astronomie stellaire sous la direction du célèbre astrophysicien Arthur Eddington. La seconde année, il se rend à l'autre Cambridge, aux États-Unis. Il travaille avec Harlow Shapley au Harvard College Observatory sur le problème des nébuleuses. Il prépare un PhD sur *Les Champs gravitationnels des fluides*, qu'il soutient deux ans plus tard au Massachusetts Institute of Technology.

En 1925, Lemaître rejoint Louvain. Deux ans plus tard, il y est nommé professeur, et il restera à ce poste jusqu'à sa retraite en 1964. Il a été unanimement apprécié par ses élèves pour son humanité et sa jovialité – pas toujours, peut-être, pour sa pédagogie, car il avait coutume de vouloir résoudre devant ses étudiants les problèmes complexes qui le préoccupaient ! C'est à Louvain que Lemaître a accompli ses grands exploits scientifiques, que les autres orateurs de cette journée commémorative ont pour tâche de commenter. Malgré ce « point fixe » et ses lourdes charges d'enseignement, Lemaître a effectué d'enrichissants séjours de recherches à l'étranger, notamment aux États-Unis (au MIT, à Harvard, en Californie) et en Afrique du Sud.

Lemaître a reçu de nombreux prix scientifiques et distinctions honorifiques. En particulier, il est devenu membre de l'Académie des sciences belge en 1941, et membre de l'Académie pontificale des sciences dès sa création en 1940. Il en a obtenu la présidence en 1960, jusqu'à sa mort survenue le 20 juin 1966. Une semaine auparavant, il venait d'apprendre la découverte observationnelle du rayonnement cosmologique, qui vérifiait de façon éclatante ses fulgurantes intuitions sur la naissance de l'Univers.

Voilà pour les éléments purement biographiques. Cela ne dit rien de profond, à vrai dire, ni sur l'homme de science, ni sur l'homme de foi. En ce qui concerne l'homme de science, je rappellerai simplement les deux principaux titres de gloire de Lemaître. En 1927, il a été le premier à relier les observations astronomiques du décalage spectral vers le rouge des galaxies (effectuées aux États-Unis par Vesto Slipher, Edwin Hubble et leurs collaborateurs) avec la théorie de l'univers en expansion, c'est-à-dire avec les solutions non stationnaires des équations de la relativité générale d'Einstein. Puis, entre 1927 et 1931, il a été le premier à envisager une origine singulière du monde physique, dans ce qu'il appelait l'« atome primitif » – modèle qui allait devenir célèbre quarante ans plus tard sous le nom de « Big Bang ». Georges Lemaître est donc le véritable père de l'idée d'évolution cosmique, qui a aujourd'hui diffusé auprès du public le plus large. En outre, physicien hors pair, Lemaître a perçu avant tous le rôle fondamental qu'a dû jouer la théorie de la mécanique quantique –

encore naissante à son époque – dans la description de l'univers primitif. Je n'insisterai pas davantage sur le sujet, car il sera développé par Jacques Demaret dans l'intervention qui suit.

Au-delà de ces deux contributions majeures dont on se rend compte, après coup, qu'elles ont littéralement transformé notre vision du monde, Lemaître a été précurseur dans d'autres domaines de la recherche scientifique, tels le rayonnement cosmique, la mécanique céleste, l'analyse numérique et les langages informatiques. Certains de ces thèmes seront également développés au cours de la journée. Pour ma part, devant conclure, je voudrais insister sur deux contributions beaucoup moins connues, mais qui me sont particulièrement chères car il s'agit de deux domaines sur lesquels j'ai moi-même voué la majeure partie de mon travail de chercheur : les *trous noirs* et la *topologie de l'Univers*. Ces deux sujets sont toujours à la frontière de nos connaissances actuelles, et là encore, Lemaître y a très tôt fait preuve d'une rare clairvoyance. Ils illustrent en particulier la grande expertise que Lemaître avait acquise dans le domaine des mathématiques. Cette qualité lui était d'ailleurs unanimement reconnue, parfois au détriment de ses qualités de physicien, qui n'en étaient pourtant pas moins grandes. Ainsi, lorsque Albert Einstein prit connaissance du modèle de Georges Lemaître sur l'atome primitif (précurseur des modèles de Big Bang), il déclara : « Vos mathématiques sont superbes, mais votre physique est abominable. » Outre la répugnance d'Einstein à envisager une cosmologie non statique (d'où son injuste appréciation de la « physique » de Lemaître), cette réaction traduit le fait que le père de la relativité générale, l'un des plus grands physiciens de tous les temps, n'était pas un mathématicien de premier ordre et, qu'à ce titre, il se laissait davantage impressionner par le savoir-faire mathématique de ses collègues que par leurs raisonnements physiques !

En ce qui concerne les trous noirs, je rappelle que la prédiction théorique de l'existence de corps suffisamment massifs et denses pour emprisonner les rayons lumineux dans leur champ gravitationnel remonte à la fin du XVIII^e siècle (Laplace et Michell). La théorie de la relativité générale d'Einstein a ranimé le débat : dès 1917, Karl Schwarzschild découvrait la métrique d'espace-temps décrivant le champ gravitationnel statique engendré par une masse sphérique sans rotation, dans le vide. Cette solution devenait apparemment singulière (en ce sens que certaines coordonnées d'espace-temps devenaient infinies) au rayon critique $r = 2GM/c^2$ (où M est la masse, G la constante de gravitation et c la vitesse de la lumière). Ce rayon était celui déjà calculé par Laplace et Michell pour leurs astres invisibles, dans le contexte de la théorie newtonienne de l'attraction universelle. Ces infinis relativistes firent « horreur » à nombre de physiciens.

Eddington en particulier qualifia le rayon critique de « cercle magique à l'intérieur duquel aucune mesure ne peut nous conduire », et dénia toute pertinence physique au concept de trou noir. Tous les astrophysiciens de l'époque lui emboîtèrent le pas... à l'exception de son ancien étudiant Lemaître, qui écrivit en 1933 : « La singularité du champ de Schwarzschild est une singularité fictive². »

Autrement dit, Lemaître fut le premier à reconnaître que la surface du trou noir n'est pas une vraie singularité, et que si des infinis y apparaissent, ce n'est qu'en raison d'un mauvais choix du système de coordonnées. Pour prouver ses dires il a construit un système de coordonnées équivalent où ces infinis disparaissent. Malheureusement, son argumentation, perdue dans un article au contexte beaucoup plus général, au lieu de faire l'objet d'une publication séparée, passa inaperçue, de sorte que le développement de la théorie relativiste du trou noir resta complètement bloqué pendant trente ans. Le caractère artificiel de la singularité de Schwarzschild ne fut redécouvert que dans les années 1960, date à partir de laquelle les fascinants modèles relativistes de trous noirs prirent leur envol³.

Passons maintenant à la topologie de l'Univers. Le propos de la cosmologie relativiste consiste à déduire des équations du champ d'Einstein des modèles d'univers physiquement plausibles. Toutefois, un tel programme ne peut être complété dans le cadre strict de la relativité générale : en effet, les équations d'Einstein étant des équations aux dérivées partielles, elles ne décrivent que les propriétés locales de l'espace-temps. Ces dernières sont contenues dans le tenseur de métrique fondamental. Mais les équations d'Einstein ne fixent pas la structure globale – la topologie – de l'espace-temps : à une métrique locale donnée, solution des équations d'Einstein, correspondent plusieurs – et même en général une infinité – de modèles d'univers topologiquement distincts.

Dès 1917, après qu'Einstein eut découvert la première solution cosmologique des équations de la relativité générale – à savoir un espace-temps statique admettant des 3-sphères pour hypersurfaces spatiales –, de Sitter remarqua que cette solution admettait une forme différente de l'espace sphérique : l'espace projectif tridimensionnel (qu'il appela « espace elliptique »), construit à partir de la sphère en identifiant les points diamétralement opposés. L'espace projectif a la même métrique que l'espace sphérique, mais une topologie différente – notamment son volume est moitié moindre.

La découverte des solutions cosmologiques non statiques par Friedmann, en 1922, et indépendamment par Lemaître en 1927, enrichit considérablement le champ de la modélisation. Dans le schéma « standard », les modèles d'univers spatialement homogènes et isotropes de Friedmann-Lemaître admettent des sections spatiales de

type sphérique, euclidien ou hyperbolique selon que leur courbure spatiale (constante) est positive, nulle ou négative. Bien que, dès 1924, Friedmann soulignât l'indétermination topologique de la relativité générale, il semble bien que ce soit encore une fois Lemaître qui, en 1958, fût le premier à affirmer que les métriques de courbure nulle ou négative admettaient des topologies spatialement fermées (de volume fini) : « Il est vrai qu'un espace localement hyperbolique n'est pas nécessairement ouvert. Il est possible de construire de tels espaces ayant un volume fini. Cela est même vrai pour l'espace euclidien⁴. »

Malgré cela, cette idée extrêmement féconde est restée largement ignorée du courant général de la cosmologie, hormis quelques exceptions⁵ – si bien que dans la grande majorité des articles de cosmologie et, ce qui est plus grave, dans les manuels spécialisés ou non traitant des modèles de Big Bang, on suppose implicitement que la topologie spatiale de l'Univers est l'hyper-sphère finie, l'espace euclidien infini, ou bien l'espace hyperbolique infini, sans mention aucune des alternatives topologiques. Cette simplification arbitraire est à l'origine d'une confusion fréquente selon laquelle, pour savoir si l'espace est fini ou infini, il suffirait de déterminer le signe de sa courbure spatiale, autrement dit de comparer sa densité d'énergie à la « densité critique ». À cet égard, les dénominations « fermés » et « ouverts » couramment utilisées pour caractériser les modèles de Friedmann-Lemaître sphériques ou euclidiens et hyperboliques contribuent à la confusion, car elles s'appliquent correctement au temps et non pas à l'espace.

Si les données astronomiques présentes indiquent que le paramètre de densité d'énergie dans l'univers observable est inférieur à la valeur critique⁶, elles n'excluent nullement les solutions de Friedmann-Lemaître à volume fini – avec ou sans constante cosmologique. D'ailleurs, des travaux récents suggèrent la nécessité d'un volume spatial fini pour bâtir des modèles d'univers consistants dans le cadre de la cosmologie quantique. Lemaître en eût certainement été enchanté.

1- Conférence donnée le 7 octobre 1994 à l'Université catholique de Louvain (Belgique), lors du centième anniversaire de la naissance de G. Lemaître.

2- G. Lemaître, *L'Univers en expansion*, Annales de la Société des sciences de Bruxelles, 1933.

3- J.-P. Luminet, *Les Trous noirs*, Paris, Seuil, « Points Sciences », 1992.

4- G. Lemaître, *La Structure et l'évolution de l'Univers*, Onzième conseil de physique Solvay, 1958.

5- M. Lachièze-Rey et J.-P. Luminet, « Cosmic topology », *Physics Reports*, 1995, *op. cit.*, et références incluses.

6- Le texte est antérieur à la découverte de l'énergie sombre, qui porte la densité totale de l'Univers à un niveau très proche de la valeur critique [Note ajoutée pour la présente édition].

Qui a inventé le Big Bang¹ ?

La révolution cosmologique a été manquée par l'inventeur de la cosmologie relativiste, Albert Einstein. Finalement, la construction du modèle de Big Bang aura été une œuvre collective. Les plus fervents partisans ne sont peut-être pas ceux que l'on croit.

Si la relativité einsteinienne fête son centenaire, la cosmologie relativiste est plus jeune de dix ans. La cosmologie – étude de la structure de l'Univers dans son ensemble – est qualifiée de relativiste dès lors qu'elle est fondée sur la relativité générale, théorie de la gravitation, de l'espace et du temps publiée par Albert Einstein en 1915. Bien naturellement, ce dernier souhaita utiliser sa toute nouvelle théorie pour décrire la structure de l'Univers dans son ensemble. La conception cosmologique qui prévalait alors était que l'Univers devait être *statique*, c'est-à-dire invariable dans le temps. Einstein s'attendait à ce que la relativité générale appuie cette opinion. Mais, à sa grande surprise, ce n'était pas le cas. Le modèle d'univers qu'il élaborait, rempli uniformément de matière et dont la géométrie était celle d'une *hypersphère* (espace de courbure positive, fini mais sans limite), n'avait pas un rayon de courbure constant : la force inexorable de la gravité, agissant sur chaque corps céleste, avait tendance à le déstabiliser.

Pour Einstein, le seul remède à ce dilemme consistait à ajouter un terme *ad hoc* mais mathématiquement cohérent dans ses équations d'origine. Cet ajout correspond à une sorte d'antigravité, qui agit comme une force de répulsion ne se faisant sentir qu'à l'échelle cosmique. Grâce à cette astuce mathématique, le modèle d'Einstein reste aussi permanent et invariable que l'univers observé à cette époque. Einstein baptisa ce terme « constante cosmologique ». Il s'agit bien d'une constante, puisqu'elle doit garder exactement la même valeur dans l'espace et dans le temps. Formellement, elle peut prendre *a priori* n'importe quelle valeur, mais celle qui fut sélectionnée par Einstein aboutissait à un univers statique.

La même année 1917, le cosmologiste hollandais Willem de Sitter bâtit un autre modèle d'univers relativiste statique, très différent de

celui d'Einstein. Il supposait en effet que la densité de matière restait nulle au cours du temps ; en contrepartie, il dut faire intervenir une constante cosmologique positive : en l'absence de matière, donc de gravité, seule une constante cosmologique pouvait déterminer la courbure de l'espace. Le rôle de la constante cosmologique s'éclairait d'un jour nouveau : dans le modèle de De Sitter, les trajectoires suivies par les « galaxies » (de masse nulle, puisque la matière est supposée absente) se séparent rapidement les unes des autres au cours du temps, comme s'il y avait une dilatation générale de l'espace. Cela signifie que, en l'absence de matière, la constante cosmologique a une influence certaine sur la structure de l'espace. Aux yeux d'Einstein, la solution de De Sitter se réduisait à une simple curiosité mathématique, dans la mesure où l'Univers réel a bien une masse.

Avec ces deux coups d'essai, Einstein et de Sitter ont manqué la révolution cosmologique contenue en germe dans la relativité, et qui se résume en une phrase : l'Univers a une histoire, donc un commencement et une destinée. L'espace n'a pas toujours été identique à lui-même, il est en expansion depuis un « moment » initial, connu sous le nom de « Big Bang ». Ce changement radical de perspective est l'œuvre de deux pionniers qui, armés de leur seul « crayon » et d'une intuition géniale, ont dévoilé cette nouvelle vision du monde : le Russe Alexandre Friedmann (1888-1925) et le Belge Georges Lemaître (1894-1966). Trois de leurs textes au moins, publiés pour le premier en 1922, pour le second en 1927 et en 1931, en font les véritables inventeurs du concept de Big Bang, l'une des découvertes majeures du XX^e siècle. Leurs noms, cependant, sont méconnus du public, et leur contribution scientifique est sous-estimée dans la communauté même des astrophysiciens et des cosmologistes.

Alexandre Friedmann est né à Saint-Pétersbourg en 1888. Diplômé de physique mathématique en 1910, il participe à la Première Guerre mondiale dans l'aviation russe. Dans la jeune Union soviétique, il est professeur à l'Université de Perm, puis, à partir de 1920, à l'Université de Leningrad, où il mène de front ses travaux météorologiques, aéronautiques et cosmologiques. Il meurt subitement d'une maladie en 1925, avant que des observations astronomiques puissent étayer son modèle d'univers.

La contribution de Friedmann à la cosmologie relativiste tient en trois textes : deux articles techniques, publiés en allemand respectivement en 1922 et 1924, et un ouvrage de semi-vulgarisation intitulé *L'Univers comme espace et temps*, publié en russe en 1923. Dans son article de 1922, « Sur la courbure de l'espace », Friedmann franchit le pas qu'Einstein n'avait pas osé faire : si l'on abandonne l'hypothèse d'un univers statique, le problème cosmologique relativiste comporte une infinité de solutions dans lesquelles l'espace

varie en fonction du temps – ce que les physiciens appellent des solutions *dynamiques*. Dans son livre de vulgarisation, Friedmann écrit : « Le type d'univers variable engendre une famille beaucoup plus générale de modèles : dans certains cas le rayon de courbure de l'univers part d'une certaine valeur et augmente constamment au cours du temps ; dans d'autres cas le rayon de courbure varie de façon périodique, l'univers se contractant en un point [de volume nul], puis, à partir de ce point, augmentant de rayon jusqu'à une certaine valeur maximale, puis diminuant à nouveau pour redevenir un point, et ainsi de suite. » Contrairement à ce qu'on a souvent prétendu, le travail cosmologique de Friedmann ne se réduit pas à un simple problème mathématique. Friedmann pose pour la première fois le problème du début et de la fin de l'Univers en termes scientifiques. Il ne peut s'empêcher d'y voir une implication métaphysique : « On peut aussi parler de la création du monde à partir de rien. »

Friedmann discute également de l'âge de l'Univers : « Si on tente de calculer le temps écoulé depuis le moment où l'univers fut créé à partir du vide jusqu'à aujourd'hui, c'est-à-dire calculer le temps depuis la création du monde, on obtient un nombre correspondant à quelques dizaines de milliards de nos années usuelles. » Cette valeur était beaucoup plus grande que l'âge connu à l'époque des plus vieux objets de l'Univers. Au début des années 1920, l'âge supposé de la Terre ne dépassait pas le milliard d'années. Le chiffre avancé aujourd'hui pour l'âge de l'Univers, 14 milliards d'années, confirme et précise la remarquable prédiction de Friedmann.

Le terme de « création du monde », une fois lancé dans le champ de la cosmologie relativiste, va susciter bien des remous et malentendus, et bloquer psychologiquement la plupart des physiciens. Au premier rang figure Einstein, qui entend d'abord réfuter Friedmann sur la base d'une erreur de calcul. Or c'est Einstein qui se trompe. Il devra se rétracter peu après, mais il n'acceptera jamais l'idée d'un commencement du monde.

L'article de 1924, « Sur la possibilité d'un univers à courbure négative constante », pose notamment, avec un demi-siècle d'avance, des questions profondes sur la topologie de l'espace. Quelques mois plus tard, Friedmann disparaît prématurément, à 37 ans, sans avoir eu la satisfaction de voir la moindre acceptation de ses idées cosmologiques.

Au même moment, un autre homme de science européen revient des États-Unis pour enseigner à l'Université de Louvain. Georges Lemaître va reprendre les intuitions prémonitoires du savant russe, et les amplifier pour bâtir le socle de la théorie moderne du Big Bang. Il est né à Charleroi en 1894. Ses études d'ingénieur sont interrompues par la guerre. Il se dirige vers la physique théorique et, parallèlement,

il est ordonné prêtre en 1923. Après des séjours scientifiques en Grande-Bretagne et aux États-Unis, il est nommé en 1927 professeur à l'Université de Louvain, où il restera jusqu'à sa mort, en juin 1966. Contrairement à Friedmann, qui ne vint à l'astronomie que trois ans avant sa mort, Lemaître se passionnera toute sa vie pour cette discipline. Il sentait l'absolue nécessité de confronter les faits d'observation et la théorie. Il n'en fut pas moins un remarquable mathématicien.

Son œuvre cosmologique s'est construite en deux phases. Il découvre d'abord, après Friedmann et indépendamment de lui, que les équations d'Einstein admettent des solutions cosmologiques dynamiques. Simultanément, il prend en compte les observations américaines sur les vitesses des galaxies, auxquelles il donne un sens physique en les interprétant comme les indices d'un univers en expansion. Dans un second temps, il ose une hypothèse encore plus audacieuse, qui est en partie un prolongement logique du concept d'expansion : si l'Univers se dilate, dans le passé il a été beaucoup plus petit, beaucoup plus dense ; un jour lointain, il a donc été condensé en un « atome primitif » dont les fractionnements successifs l'ont façonné tel qu'il est maintenant. Revue et corrigée au fil du temps, cette conception est devenue la théorie du Big Bang.

Reprenons brièvement le fil de la pensée cosmologique de Lemaître. En 1925, l'astronome américain Edwin Hubble accomplit un pas décisif en cosmologie observationnelle, en démontrant que les nébuleuses spirales sont d'autres systèmes d'étoiles analogues à notre propre galaxie. Son collègue Vesto Slipher a déjà mis en évidence un décalage vers le rouge quasi systématique des raies spectrales du rayonnement de ces nébuleuses. Ces décalages impliquent une vitesse de récession, mais aucune interprétation théorique ne peut être donnée à ce mouvement de fuite.

En 1927, Lemaître publie en français son article fondamental, « Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques ». Comme son titre l'annonce, il relie l'expansion de l'Univers qui découle des solutions cosmologiques de la relativité générale aux observations de Slipher et Hubble.

Lemaître annonce en outre une relation de proportionnalité entre la vitesse de fuite et la distance. L'article du jeune savant belge n'est pas plus apprécié que ne l'avaient été ceux de son prédécesseur russe. Einstein, lors de sa première rencontre avec Lemaître en 1927, lui fait quelques remarques techniques favorables, mais conclut que du point de vue physique, cela lui paraît « tout à fait abominable ».

En 1929 cependant, Hubble publie la loi expérimentale de proportionnalité entre la vitesse de fuite des galaxies et la distance (loi

qui portera désormais son nom). Ses chiffres sont identiques à ceux énoncés par Lemaître deux ans auparavant (sans que Lemaître soit, bien entendu, cité). En 1931, l'astrophysicien britannique Arthur Stanley Eddington fait traduire en anglais l'article de Lemaître de 1927. Pour une raison mystérieuse, un paragraphe est omis : celui où Lemaître énonçait la « loi de Hubble » !

Dès lors, l'Univers en expansion devient le nouveau paradigme cosmologique. Einstein lui-même finit par l'accepter, bien que difficilement. Mais au moment même où Eddington et Einstein rejoignent Lemaître dans sa vision d'un univers dynamique, le savant belge est déjà plus loin, en envisageant qu'il a commencé son expansion à partir d'un état initial singulier, qu'il nomme l'« atome primitif ». Entre eux va ainsi se creuser le fossé d'une autre controverse, qui ne se résoudra pas de leur vivant : celle de la *naissance* même de l'Univers.

Cette idée capitale, Lemaître la développe dans deux textes essentiels publiés tous deux en 1931 : une courte lettre à *Nature* intitulée « The beginning of the world from the point of view of quantum theory », et un article plus technique, « The expanding Universe », publié dans les *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

La lettre de *Nature* est sans conteste l'un des articles les plus remarquables de toute l'histoire des sciences. Il constitue la « charte » de la théorie du Big Bang, contenant en germe les développements futurs de la cosmologie quantique, le rôle de la constante cosmologique interprétée comme l'énergie du vide quantique, le processus de formation des galaxies, etc.

Pour Lemaître, la phase initiale de l'histoire cosmique est une expansion de type explosif, issue de la désintégration radioactive d'un quantum originel : l'atome primitif. Lemaître utilise l'image du « feu d'artifice » qui, si elle est poétique, n'en est pas moins pédagogiquement contestable : elle a été source d'un malentendu constamment reconduit par la littérature de vulgarisation, présentant le Big Bang comme une explosion ponctuelle de matière dans un espace extérieur.

Le raisonnement du savant belge s'appuie sur la volonté d'utiliser les nouvelles connaissances de la physique atomique et de lier les nébuleuses aux atomes : « Une cosmogonie vraiment complète devrait expliquer les atomes comme les soleils », écrit-il joliment.

Personne n'a pensé et défendu avec une telle force cette conception du commencement du monde : « Nous pouvons concevoir que l'espace a commencé avec l'atome primitif et que le commencement de l'espace a marqué le commencement du temps. » Les termes de genèse et de création soulèvent des tempêtes de

protestations chez les physiciens, mais il faut souligner que la vision de Lemaître n'a jamais reposé sur une confusion scientifico-religieuse. Il avait, au contraire, une conception *naturelle* de l'origine s'opposant à une création *supernaturelle*. « Je pense que quiconque croit à un Être suprême soutenant chaque être et chaque acte, croit aussi que Dieu est essentiellement caché, et peut se réjouir de voir comment la physique actuelle fournit un voile cachant la création », écrit Lemaître dans un texte inédit de 1931. Pour le prêtre-savant, Dieu sera toujours un Être suprême et inaccessible, ce qui lui permet de préserver l'origine du monde dans les strictes limites de la physique, sans la mêler à une création *supernaturelle*. Il est bon de souligner cette rigueur théologique quand on voit aujourd'hui des cosmologistes américains qui ont déclaré avoir vu le « visage de Dieu » après avoir détecté expérimentalement les inhomogénéités du fond diffus cosmologique !

Toujours est-il que les physiciens de l'époque reçoivent très mal l'idée d'atome primitif. La spécialité de mathématicien de Lemaître, ainsi que son engagement religieux, ont sans doute cristallisé les résistances naturelles qui accompagnent toujours l'instauration d'une nouvelle vision du monde.

Einstein doit malgré tout faire son autocritique ; non sans réticences, il finit par admettre la pertinence physique des solutions de Friedmann, et il écrit en 1932 : « La découverte de l'expansion des nébuleuses extragalactiques justifie le passage de la théorie à des solutions dynamiques de la structure de l'espace, une voie qui ne devait apparaître auparavant que comme une issue nécessitée par l'insuffisance de la théorie. » La même année, il s'unit à de Sitter pour « rattraper le coup » : ils publient un article d'une petite page où ils font valoir qu'un univers en expansion est aussi possible sans introduire ni courbure spatiale, ni pression, ni constante cosmologique. Il suffit pour cela que la densité de matière soit exactement égale à la valeur critique qui sépare le cas sphérique (courbure positive) du cas hyperbolique (courbure négative).

Ce travail, il faut le reconnaître, est un singulier appauvrissement des calculs effectués précédemment par Friedmann et Lemaître. Que d'efforts de la part d'Einstein et de Sitter pour retrouver la solution la plus simpliste ! Bien leur en a pris cependant au regard de l'histoire. Leur article tombe au bon moment, avec deux prestigieux signataires ; c'est donc lui qui va rester dans les mémoires, et longtemps occulter la profonde richesse des solutions génériques de Friedmann et Lemaître – à tel point que, durant plusieurs décennies, la grande presse scientifique publiera régulièrement des « scoops » sur une prétendue incompatibilité entre la théorie du Big Bang et l'âge des étoiles, sur la seule base de la solution simplifiée d'Einstein-de Sitter (qui a, en effet, été éliminée par les observations).

Par la suite, Einstein, comme traumatisé d'être passé à côté de l'une des conséquences majeures de sa théorie (il fera de même avec les trous noirs et avec la physique quantique !) a cessé de publier dans le domaine de la cosmologie. Dans sa correspondance, il lui arrivera encore d'aborder la question cosmologique, mais en y exprimant toujours le regret de ne pas avoir fait ce qu'il fallait. « Pas plus que d'autres, a écrit Lemaître dans un hommage à Einstein paru deux après sa mort, sur des sujets qui lui tenaient bien plus à cœur, je n'ai pu le convaincre ni, je dois l'avouer, saisir sa pensée d'une façon bien précise. » Réciproquement, le père de la relativité n'a jamais saisi la pensée cosmologique de Lemaître, le véritable père du Big Bang.

L'une des anomalies de l'histoire des sciences récente veut que dans l'esprit, et sous la plume, de nombreux écrivains scientifiques à large audience, les concepts d'univers en expansion et de Big Bang soient attribués à Edwin Hubble et Albert Einstein. Or, si Edwin Hubble a bien mis en évidence expérimentale la relation linéaire entre le décalage spectral vers le rouge des galaxies et leur distance, il n'a ni découvert ce décalage spectral systématique (la primeur de la découverte revient à Vesto Slipher), ni accepté l'interprétation relativiste de ses observations, c'est-à-dire l'expansion de l'espace en lieu et place d'un déplacement réel des galaxies. Quant au génial inventeur de la théorie de la relativité, il a rejeté pendant plus de dix ans l'idée d'un univers évolutif, et il a cessé de travailler dans le domaine dès lors que, face à l'évidence observationnelle, il a dû amender son opinion.

Les contributions respectives des hommes de science ayant participé à l'élaboration du nouveau paradigme cosmologique se résument ainsi : Einstein a créé la théorie de la relativité générale et écrit les équations gouvernant les propriétés physico-géométriques de l'Univers ; Friedmann a découvert les solutions non statiques de ces équations, décrivant la variation temporelle de l'espace, et entrevu son possible commencement dans une singularité ; Lemaître a relié l'expansion théorique de l'espace au mouvement observé des galaxies, jeté les bases physiques du Big Bang et anticipé le rôle fondamental joué par la mécanique quantique et l'énergie du vide ; Gamow, Alpher et Herman ont montré comment les éléments légers se sont formés dans l'univers chaud des origines, et prédit l'existence du rayonnement fossile ; Hubble, enfin, a prouvé la nature extragalactique des nébuleuses spirales, et assis expérimentalement la loi de proportionnalité entre leur vitesse de récession et leur distance.

Friedmann et Lemaître ont introduit une révolution scientifique de même ampleur que la révolution copernicienne. Dans la cosmologie précopernicienne, l'espace était centré sur un lieu très particulier, la Terre. Dans la cosmologie préfriedmannienne, le déroulement

temporel de l'Univers était réduit à un cas très particulier, la staticité, c'est-à-dire l'absence de toute évolution. Les cosmologies de Friedmann et Lemaître introduisent de façon irréversible l'historicité de l'Univers et l'idée d'un commencement. Friedmann et Lemaître s'inscrivent ainsi dans la lignée des grands novateurs que furent Ptolémée, Copernic, Kepler, Galilée, Newton et Einstein.

¹ - Article paru en septembre 2004 dans la revue *Ciel et Espace*, hors série « Einstein ».

Art, espace et imaginaire

« Dans les ténèbres, l'imagination travaille plus activement qu'en pleine lumière. »

Emmanuel KANT,
La Fin de toutes choses.

Clair-obscur radiatif¹

Imaginaire et imagination

Poser la question du rapport entre l'art et la science n'est guère original en soi ; néanmoins le sujet est d'importance et implique toujours des réponses très personnelles. Je prends donc le risque de l'aborder à ma façon.

On a tendance à croire généralement que la mission de l'art est de nous faire toucher l'impalpable, alors que celle de la science ne consisterait qu'à fournir un jeu de « questions-réponses ». Or il existe une authentique création scientifique dans laquelle le jeu s'inverse et se déploie en « réponses-questions ». L'interrogation, qui peut naître autant de l'absence que d'un trop-plein de réponses, est à mon sens une porte d'accès commune à ces deux aires de la connaissance humaine. Pourquoi ? Parce qu'à la source de l'interrogation se situe l'imaginaire.

En science, l'imaginaire est d'autant plus prégnant que se posent des problèmes de visualisation, de représentation. Je me souviens qu'étant adolescent, j'ai lu dans une encyclopédie qu'un certain Albert Einstein avait démontré que l'espace et le temps n'étaient pas aussi simples que ce que notre intuition première nous disait. En particulier, que l'Univers pouvait être « courbé ». Une image très forte s'est aussitôt déclenchée en moi. À la saveur des mots s'est ajoutée leur valeur métaphorique. Le « mollusque d'espace-temps » einsteinien a résonné dans mon imaginaire en y faisant naître l'image pittoresque de l'espace-temps comme la peau d'un immense escargot striée de lumière, variée en courbures et en formes. Je suis devenu fasciné par l'idée que l'Univers, que je percevais à la manière de tout un chacun, c'est-à-dire comme un espace euclidien plutôt simple, puisse être déformé, tordu, cabossé. De la même façon, mais plus tard, le concept de « trou noir » a sollicité mon imaginaire, ainsi que tous les problèmes touchant aux fondements de la physique qui sont ardu à visualiser.

Le point de départ de toutes mes réflexions scientifiques a donc bien été l'imaginaire. Mes études de mathématiques m'ont permis d'aborder les problèmes liés à la relativité, aux trous noirs et à la

cosmologie de façon professionnelle. Autrement dit, en explicitant de façon rationnelle ce que certains mots, idées ou concepts déclenchent, la recherche scientifique prend le relais de l'imaginaire – sans le combler vraiment. J'apprécie beaucoup cette réflexion de Paul Valéry : « Le travail interne du poète consiste moins à chercher des mots pour ses idées qu'à chercher des idées pour ses mots et ses rythmes prédominants. » Elle peut sans doute être généralisée à toute forme d'expression artistique, et parfois même, scientifique... dans mon cas tout du moins. Si l'imaginaire est la racine de l'interrogation, l'imagination en constitue la tige.

Et l'imagination, me direz-vous ? C'est en quelque sorte une « machination » de l'image : elle développe en images l'imaginaire, qui n'en a point. Elle est de l'ordre de la représentation, de la technique. Poser un problème fait appel à l'imaginaire, le résoudre fait appel à l'imagination. Pour résoudre des équations, il faut de l'imagination.

Trou noir et cosmologie

Ce qui me fascine tout particulièrement dans la recherche scientifique, ce sont d'une part les distorsions qui existent entre le monde « réel » et le monde perçu, d'autre part tout ce qui pose un problème de représentation quasi insoluble. L'exemple type est évidemment celui du *trou noir*, concept fascinant, mais par définition impossible à visualiser directement. En effet, l'idée de trou noir découle de la théorie de la relativité générale ; on ne peut en comprendre toutes les propriétés qu'en résolvant les équations appropriées (et encore...). Le passage au mot et à la visualisation s'avère extrêmement difficile puisque, par sa nature même, le trou noir est invisible car il ne laisse échapper ni matière ni lumière. Tenter quand même de le représenter de façon scientifique, c'est mettre l'imagination en route : imaginer par exemple ce trou noir entouré de gaz brillant, qui l'éclaire d'une certaine façon, révélant ainsi la présence de l'invisible. Cela a constitué l'un de mes premiers travaux de recherche. À la fin des années 1970, j'ai ainsi été le premier à présenter, aux scientifiques et au grand public, la première « photographie » de trou noir calculée par ordinateur. J'en ai même fait un film².

Un autre thème majeur où la science se heurte rapidement à l'épuisement de l'image et du concept est la *cosmologie* – cette branche de l'astrophysique qui étudie la structure et l'évolution de l'Univers dans son ensemble. L'imaginaire de tout un chacun, à commencer par celui des scientifiques spécialistes en la matière, y est d'autant plus sollicité que le problème touche de très près aux mythes de la création.

L'une des raisons pour lesquelles le public est fasciné par l'idée de Big Bang³ est en effet la référence à nos origines ; le modèle scientifique rejoint ainsi les mythes de création du monde, présents dans toutes les cultures et toutes les civilisations. La référence est cependant pleine de pièges et d'incompréhensions. Par exemple, la façon traditionnelle de « vulgariser » le concept d'expansion cosmique consiste à prendre l'image d'un ballon qui se dilate. Des pastilles collées à la surface du ballon représentent les galaxies. Quand le ballon gonfle, les distances entre toutes les pastilles augmentent. L'analogie est bonne pour visualiser le fait que l'expansion cosmique sépare effectivement toutes les galaxies entre elles. Il y a toutefois un hic : comme dans toute analogie, certains aspects sont correctement traduits, mais d'autres le sont beaucoup moins bien. Ici, l'image du ballon est source d'une erreur fondamentale : comme le ballon a un centre et gonfle « dans quelque chose », en l'occurrence dans un espace contenant, le public croit souvent qu'il en est de même pour l'Univers. Or l'expansion cosmique n'a pas de centre et ne se déroule pas dans un espace extérieur. Le Big Bang est tout aussi incompris du grand public, qui l'imagine le plus souvent comme une gigantesque explosion localisée dans l'espace (mais où ?) et dans le temps (le mythique « temps zéro » de la Création). D'où les innombrables et agaçantes tentatives de « récupération » de ce modèle scientifique à des fins métaphysiques, religieuses, idéologiques, etc. J'ose ajouter que même les cosmologistes professionnels restent à cet égard fortement imprégnés de leurs préjugés philosophiques ou religieux.

Topologie de l'Univers

En cosmologie, le problème se situe au niveau de la représentation même de l'espace et du temps. Mes dernières recherches sur la topologie de l'Univers (la topologie, qui signifie étymologiquement « connaissance des lieux », est la branche particulière de la géométrie qui se préoccupe des propriétés globales des espaces, et notamment de leur forme) me font appeler à la rescousse l'imaginaire des mathématiciens. Les mathématiques sont en effet la voie royale de l'imagination fécondée par l'imaginaire. Sans référence aucune au monde réel, les mathématiciens jonglent avec des espaces à n'importe quel nombre de dimensions, dont le nôtre, à quatre ou trois dimensions selon que l'on inclut le temps ou non, n'est qu'un cas très particulier. En classifiant les formes possibles des espaces, ils ont trouvé des résultats stupéfiants. Toutefois, comme les mathématiques elles-mêmes sont cloisonnées, à l'instar de toutes les disciplines scientifiques, ces résultats ne sortent guère du cercle des spécialistes.

Les mathématiciens topologues ont entrepris de classer toutes les formes possibles d'espaces. Prenons par exemple les surfaces, c'est-à-dire les espaces à deux dimensions. Elles sont de trois types : les sphériques (qui ont une courbure positive, comme la surface d'un ballon), les euclidiennes (qui n'ont pas de courbure, et dont la géométrie est celle que nous avons tous apprise sur les bancs de l'école) et les hyperboliques (qui ont une courbure négative, comme par exemple certaines parties d'une selle de cheval). À l'intérieur de ces trois types, les mathématiciens ont trié tous les types de surfaces. Ainsi, il n'existe que deux formes possibles de surfaces sphériques : la sphère proprement dite, évidente à visualiser, et le « plan projectif », diabolique à visualiser. Pour les surfaces euclidiennes, il n'y a que cinq formes possibles : le plan, bien sûr, mais aussi le cylindre, le tore, le ruban de Möbius (qui présente le paradoxe de n'avoir qu'une seule face) et la bouteille de Klein. Cette dernière est également difficile à visualiser : bien que sans courbure, elle est refermée sur elle-même, et elle n'a ni endroit ni envers ; on dit qu'elle n'est pas « orientable ». L'artiste néerlandais M. C. Escher a tenté toute sa vie de représenter ces surfaces bizarres dans des gravures étranges et déroutantes. Enfin, les surfaces hyperboliques sont en nombre infini. Il suffit de creuser des trous dans une surface ou de lui rajouter des « anses » pour engendrer de nouvelles formes hyperboliques ! Par exemple, la surface d'une fougasse est hyperbolique.

Bref, les mathématiciens se sont ensuite attaqués à la classification des espaces à trois dimensions, et ils ont découvert des formes fascinantes, connues pratiquement d'eux seuls, mais qui peuvent être appliquées de façon pertinente à la description de l'Univers réel, puisque l'espace physique est bien, semble-t-il, à trois dimensions. En quelques lignes, disons que les fameux modèles de Big Bang, qui décrivent l'expansion de l'Univers à partir d'un état initial singulier, nous disent que l'espace est soit de type sphérique, soit de type euclidien, soit de type hyperbolique. S'il est sphérique, alors il est fini dans l'espace et « fermé » dans le temps, c'est-à-dire qu'après la phase actuelle d'expansion il entrera en contraction et son histoire s'achèvera dans un Big Crunch. S'il est de type euclidien ou hyperbolique, l'Univers est « ouvert » dans le temps, c'est-à-dire que son expansion se poursuivra éternellement. En revanche, on ne sait plus dans ce cas si l'espace est fini ou infini, car la topologie nous apprend qu'il existe un nombre gigantesque de possibilités, et c'est justement ceci qui reste ignoré de la plupart des cosmologistes.

Actuellement, le modèle d'univers le plus en vogue (parce que le plus plausible) en est un où la courbure d'ensemble est voisine de zéro⁴, c'est-à-dire un espace globalement euclidien qui se dilate au cours du temps. Si l'on ne connaît pas les travaux des topologues, on

croit que l'espace euclidien est nécessairement infini. Or il existe dix-huit formes complètement différentes d'espace euclidien à trois dimensions ! J'insiste bien sur le fait que, dans chacune, toutes les propriétés géométriques énoncées par Euclide au III^e siècle avant notre ère sont vérifiées, par exemple le fait que deux parallèles ne se recoupent pas. Toutefois, le problème de l'infini ne peut être résolu par des mesures géométriques. La topologie permet de décrire des espaces à trois dimensions qui, tout en étant localement euclidiens, ont des sortes de « trous » ou de « poignées », et qui peuvent parfaitement être fermés sur eux-mêmes. Je donnerai un seul exemple, qui généralise à trois dimensions celui du tore (et qu'on appelle donc « hypertore ») : l'espace défini par l'intérieur d'un cube ordinaire dont on considère que les faces opposées deux à deux sont identiques est un espace euclidien fermé. Toutes ces variantes topologiques d'espace à trois dimensions peuvent être appliquées aux équations de la relativité générale d'Einstein, et sont des modèles pertinents du monde réel. On peut donc bâtir des modèles d'univers que j'appelle *chiffonnés*, à cause de leur forme quelque peu biscornue, qui ne contredisent ni la théorie ni les observations.

Réalité illusoire/illusion réaliste

Reste à savoir quel est le rapport entre le monde réel et le monde perçu. Ce dernier est inévitablement brouillé par l'imperfection de nos sens : notre cerveau, récepteur imparfait, agit comme un filtre qui empêche d'atteindre une éventuelle « réalité ultime ». Les recherches deviennent fascinantes lorsque la physique nous dit qu'il y a aussi un brouillage « objectif » qui reflète la nature physique même du monde, indépendamment de nos sens. Dans le domaine subatomique, décrit par la physique quantique, le principe d'incertitude de Heisenberg illustre ce type de brouillage. Un objet quantique (par exemple un électron) n'a de réalité que si l'on effectue une mesure sur lui ; de plus, la mesure elle-même modifie les propriétés de l'objet. Il existe donc un brouillage intrinsèque du monde quantique, ce que Bernard d'Espagnat appelle le *réel voilé*. Le réel n'est pas seulement voilé par nos facultés de perception limitées, il est voilé par la nature même du monde.

Au niveau macroscopique, il est déjà intéressant de constater qu'un certain brouillage intervient à l'échelle de l'Univers lui-même, à cause de ce que l'on appelle les « mirages gravitationnels ». Ceux-ci, prédits par Einstein, ont été découverts par l'observation il y a moins de dix ans et sont le reflet de la nature courbe de l'espace-temps : les rayons lumineux émis par les astres très lointains (galaxies, quasars) ont toutes les chances de rencontrer sur leur trajet jusqu'à nous,

observateurs, des masses intermédiaires (étoiles, galaxies, amas de galaxies). Ces masses intermédiaires, en courbant l'espace dans leur voisinage, perturbent les trajets des rayons lumineux et engendrent de véritables illusions d'optique, des mirages qui peuvent déformer, amplifier, démultiplier les images des sources plus lointaines situées derrière. Le cosmologiste doit donc savoir faire la part entre la réalité astronomique et ces illusions d'optique cosmiques. Avec les modèles d'univers chiffonnés, le brouillage cosmique pourrait être complet, et non plus seulement localisé dans certaines directions d'observation. La *forme globale de l'espace* démultiplierait presque à l'infini les trajets possibles de la lumière entre une source lointaine et nous-mêmes, de sorte que nous serions plongés dans un univers d'apparence extrêmement différente de ce qu'il est en réalité. Par exemple, chaque galaxie « réelle » aurait des centaines d'images fantômes réparties dans toutes les directions, mais qu'il serait difficile de reconnaître en tant que telles. L'Univers pourrait nous paraître vaste, « déplié », contenant des milliards de galaxies, tandis qu'il serait en réalité beaucoup plus petit, « plié » (ou chiffonné), contenant beaucoup moins d'objets authentiques. Quelle énorme illusion d'optique ! Où serait l'illusion, où serait la réalité ? Seule une étude statistique pourrait révéler la nature chiffonnée de l'espace, et c'est précisément le sujet de mes recherches les plus récentes.

Vous voyez combien ce questionnement sur la réalité cosmologique est profondément sollicité par l'imaginaire et comment l'imagination entre en jeu pour résoudre « en pratique » le dilemme réalité/illusion. Des simulations numériques effectuées sur ordinateur peuvent livrer la clé de l'énigme, en calculant des modèles artificiels d'univers chiffonnés qui sont ensuite comparés à l'univers observé. Ce qui revient à dire que le calcul constitue une étape obligée de la mise en image. Le contraire n'est-il pas possible, à savoir, « imaginer » une solution avant de la calculer ? Cela dépend du sens exact que l'on donne au terme assez vague « imaginer ». En réalité, une sorte d'aller-retour s'opère entre le concept et l'image. Dans l'exemple particulier des univers chiffonnés, seul le calcul permet effectivement de visualiser correctement l'apparence du ciel, tant les mathématiques sous-jacentes sont déroutantes. L'exemple de l'hypertore que je citais plus haut est extrêmement simple sur le plan conceptuel, mais déjà incroyablement « pervers » sur le plan de la visualisation. Ne parlons pas des espaces dont le concept même est compliqué ! Alors, que faire pour passer du concept à l'image ? Dans une première étape, on s'imagine être un observateur plongé dans un tel espace fictif, peuplé de galaxies fictives. Les équations de propagation des rayons lumineux sont ensuite calculées par l'ordinateur, de façon à obtenir la distribution des images fantômes des galaxies. Enfin, on compare le

résultat à ce que l'on observe réellement dans le ciel.

La démarche peut tout à fait être inversée. C'est ainsi que, quelques années auparavant, lorsque j'avais calculé par ordinateur l'apparence d'un trou noir entouré d'un disque de gaz chaud, avant même de « faire tourner » l'ordinateur, je m'étais fait une petite idée sur l'image que je devais obtenir. Il faut avouer que le problème était d'une part moins difficile que celui des univers chiffonnés, d'autre part qu'aucune comparaison avec l'observation n'était possible. J'étais là, en quelque sorte, dans le processus inverse : d'abord l'idée, puis la mise en image « intérieure », enfin le calcul. Ce dernier se réduit alors à une simple fonction de vérification, en quelque sorte le « limage » de l'image.

Somnambules visionnaires

L'une des principales qualités du chercheur est donc la richesse de son imaginaire. Après tout, sa tâche n'est-elle pas d'inventer, de découvrir, d'offrir ce qui n'existe pas encore dans la connaissance générale ? Sa « fonction imaginante » est de première importance. Mais comment mesurer l'imaginaire de quelqu'un ? Il est vrai que tout au long de sa carrière, un chercheur doit mettre en œuvre toute sa créativité avant d'aboutir à une publication – la publication, partie émergée de l'iceberg de la pensée scientifique. En ce sens, son travail ressemble à celui du musicien virtuose qui offre au public, le temps éphémère d'un concert, le fruit de centaines d'heures d'un travail acharné et laborieux.

Je reviendrai plus loin sur les similitudes entre scientifiques et artistes. Pour l'heure, retenons que l'imaginaire est à la base de toute avancée scientifique. N'est-il pas à l'origine des grands changements de vision du monde, de l'Antiquité à nos jours ? L'histoire de la science occidentale, tout du moins de la pensée cosmologique, est en effet marquée par quelques grandes révolutions déclenchées par des savants que l'on peut qualifier de « visionnaires ». Il y a d'abord eu les Grecs d'Alexandrie, d'Aristarque de Samos (III^e siècle av. J.-C.) à Ptolémée (II^e siècle ap. J.-C.), en passant par Ératosthène et Hipparque, qui ont géométrisé le monde. Puis est venue la révolution mécaniste du XVI^e siècle, due à Galilée et à Kepler. À la fin du XVI^e siècle, Newton a élaboré le premier modèle cohérent et fonctionnel du cosmos. Enfin, Einstein, au début du XX^e siècle, a renouvelé entièrement les concepts d'espace, de temps et de matière. Tous ces « héros » de la science étaient des visionnaires, en ce sens que leur imaginaire était exceptionnellement développé. La remarquable étude historique d'Arthur Koestler intitulée *Les Somnambules* raconte comment ces grands savants pouvaient entrer dans de véritables états

seconds au cours desquels ils devenaient impérieusement soumis à leur imaginaire. Dans certains cas d'ailleurs, tels Kepler et Newton, l'imaginaire était si riche, si foisonnant, qu'il est devenu par la suite encombrant pour leurs hagiographes, c'est-à-dire pour certains historiens des sciences qui ont voulu donner de leur héros une image lisse, entièrement rationnelle. Or l'imaginaire de ces grands penseurs était nourri de toutes sortes de réflexions dans des domaines dépassant largement celui de la stricte rationalité.

On peut dire qu'à la naissance du rationalisme scientifique qui allait totalement envahir la discipline, des chercheurs comme Kepler, qui était aussi astrologue et mystique pythagoricien, ou comme Newton, féru d'alchimie, de théologie et de références bibliques, savaient manier un double langage (ce qui rappelle le double fonctionnement du cerveau) : celui des symboles et des images où s'exprime l'inconscient et celui de la rationalité en voie de structuration, qui est le langage du signe et de la raison. Cette irruption de l'irrationnel dans la pensée scientifique la plus rigoureuse peut surprendre, sauf si l'on admet bien que tout naît d'un imaginaire foisonnant. Regardons Kepler. Né dans un petit village au sein d'une famille vivant dans des conditions misérables, il était bourré de complexes. Tout est devenu nourriture pour son imaginaire, depuis les brimades de ses camarades qui le traitaient littéralement comme un chien, jusqu'aux arcanes de la géométrie grecque auxquels un vieil oncle l'avait initié. Kepler a commencé par imaginer un système du monde fondé sur les « solides parfaits » de Platon pour définir les orbites planétaires. En 1596, il s'est rendu à la cour de Frédéric de Wurtemberg pour le persuader de faire construire une maquette de l'Univers incorporant les cinq solides parfaits sous la forme d'un distributeur de boissons ! Les symboles des planètes seraient taillés dans des pierres précieuses : un diamant pour Saturne, une hyacinthe pour Jupiter, une perle pour la Lune, etc. La coupe verserait plusieurs breuvages, que des tuyaux dissimulés amèneraient de chaque sphère planétaire à sept robinets disposés sur le rebord. Mercure fournirait du marc, Vénus de l'hydromel, Mars un fort vermouth, et ainsi de suite. Frédéric fut séduit par une telle merveille mais il conseilla à Kepler de fabriquer d'abord un modèle réduit moins coûteux, en cuivre... N'ayant pas les moyens de se lancer dans de telles dépenses, Kepler utilisa du carton. Possédé d'une véritable fièvre créatrice, car persuadé d'avoir découvert les secrets de l'œuvre divine, il travailla d'arrachepied à la réalisation de cet Univers en miniature. Son projet n'a jamais abouti. De toute façon, il s'est rendu compte plus tard de ses « errements ». C'est pourtant à partir de ces idées délirantes qu'il a fini par découvrir le mouvement elliptique des planètes, une véritable révolution conceptuelle qui a renversé deux mille ans de règle

sphérique !

Regardons maintenant Newton, ce contemplatif de la nature dont la légende veut qu'il ait découvert la gravité en observant la chute d'une pomme. Vers la fin de sa vie, la majeure partie de ses écrits qui n'étaient pas de nature physique a été mise sous clé dans une grande malle. Il s'agissait de traités d'alchimie, de théologie, de chronologie, d'hermétisme, d'ésotérisme, d'occultisme, bref, une œuvre d'un volume considérable mais déroutante. Ses premiers historiographes, qui l'ont quasiment déifié de son vivant, n'ont voulu retenir de lui que son œuvre rationnelle. La malle secrète demeurerait cependant, et dans les années 1930, le célèbre économiste John Maynard Keynes l'a achetée aux enchères sans savoir vraiment ce qu'elle contenait. Il a fallu plusieurs années pour que les historiens dépouillent ces nouvelles archives qui ne parlaient que de magie, d'alchimie, de thaumaturgie, bref d'une « connaissance interdite ». Et il a bien fallu quelques années encore pour admettre enfin cette composante irrationnelle chez Newton. Pour ma part, je suis persuadé que sans cette nourriture supplémentaire pour son imaginaire, il n'aurait pas écrit ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, ce monument exemplaire du rationalisme.

Dernier exemple, Einstein. Il a souvent insisté sur la primauté de l'imaginaire et de l'imagination sur la technicité et le savoir-faire. Il a notamment raconté qu'étant enfant, il s'imaginait fréquemment en train de chevaucher un rayon lumineux et se demandait alors comment lui apparaîtrait le monde. La relativité semble en partie sortie de ce rêve d'enfant ! Il semble que toutes les grandes découvertes montrent que pour laisser émerger de la nouveauté, il faut savoir mettre entre parenthèses tout jugement établi, tenter notamment de mettre en relation les deux hémisphères du cerveau aux spécialisations si diverses. Certes, il n'est pas facile d'oser le saut dans l'inconnu, de ne craindre ni la chute ni le ridicule. Bref, de s'exercer dans un certain *délire*.

Toutefois, dans le domaine scientifique, le délire doit être strictement contrôlé pour avoir la moindre chance d'aboutir à quelque chose de validable par autrui. Même si le délire est grand, il reste somme toute organisé et paraît le fruit d'une réflexion générale. La maîtrise du délire est chose extrêmement aventureuse. C'est la raison pour laquelle, dans toute l'histoire des sciences, seule une très faible fraction de penseurs a déliré suffisamment « loin et bien » pour déclencher des changements de vision du monde. Il n'y a peut-être eu, je pense, qu'une dizaine de grands « somnambules » (pour reprendre l'expression de Koestler que je citais tout à l'heure) qui, soit par chance, soit par concours de circonstances, soit par intuition très profonde, ont réellement innové dans la compréhension du monde. À

cela, je dois apporter une réserve : les progrès de la science ne sont pas uniquement dus à quelques individus exceptionnellement perspicaces, ils sont aussi le fruit d'un formidable effort collectif et s'inscrivent toujours dans un contexte social, économique et politique.

Les nourritures de l'imaginaire

Si nous posons que d'une vaste étendue de l'imaginaire dépend l'émergence possible de la créativité, il reste à savoir comment nourrir son imaginaire. Il s'agit là, en fait, d'une question individuelle, et je ne puis parler que pour moi. Ma « méthode » consiste à démultiplier les domaines d'intérêt. Mon questionnement sur le monde passe en effet non seulement par la science, dont je fais profession, mais aussi par la poésie, la littérature, le dessin ou la musique. Cette multiplicité n'est pas nécessairement partagée par d'autres chercheurs très créatifs.

Une question délicate qui m'est parfois posée est de savoir si, en exerçant mon imaginaire pour la recherche scientifique ou bien en écrivant de la poésie, disons, mon cerveau fonctionne oui ou non de la même façon. Je dirais que le fonctionnement de l'imagination est totalement différent. Il y a un océan commun tout au fond de nous, dans lequel baigne notre imaginaire. Et ses manifestations, autrement dit les fonctionnements de l'imagination, sont différentes selon les domaines d'activité. Quand j'écris de la poésie, je dois d'abord descendre à la source, au ras de cet océan, mais je n'emprunterais pas les mêmes escaliers que ceux conduisant à m'interroger sur la forme de l'espace-temps, par exemple, ou pour dessiner, ou pour composer de la musique. On a envie d'appeler cet océan le « réel », mais il est impossible de savoir s'il s'agit d'une réalité purement intérieure ou bien extérieure reflétant l'extraordinaire multiplicité du monde.

Dans le fonctionnement de type scientifique, la réduction de l'imaginaire passe nécessairement par un langage rationnel qui se veut objectif. Galilée disait joliment que l'Univers est un livre perpétuellement ouvert devant nos yeux, écrit dans le langage universel des mathématiques et de la géométrie. Le scientifique tente de décrypter le monde extérieur indépendamment de son psychisme. La question qui se pose est donc de savoir si l'artiste, quand il écrit un poème ou compose de la musique, ne traduit pas lui aussi une certaine « réalité » indépendante qu'il perçoit confusément, même si la représentation qu'il en donne est totalement subjective. En d'autres termes, l'artiste peut-il, par des formes d'investigation qui lui sont propres, appréhender des éléments d'une réalité objective extérieure à lui, éléments diffus mais exprimables exclusivement dans un langage non rationnel ? Toute la question est là ! L'art, au contraire de la science, n'ayant pas pour propos de rationaliser le monde, offre en fait

un champ d'interrogations plus vaste, et les plongées dans l'océan de l'imaginaire nécessaires à la créativité artistique sont sans doute plus fréquentes et moins contrôlées que dans la démarche scientifique.

Ombre et lumière

Dans ma double démarche de scientifique et d'artiste, je perçois – si l'on m'y force, c'est-à-dire en me posant avec insistance la question ! – quelques éléments communs de mon imaginaire, et qui stimulent ma créativité dans les deux domaines. J'en citerai deux : les distorsions, comme je l'ai mentionné plus haut, mais aussi et surtout le *noir*.

Le fait est que j'ai toujours été ému par le noir. Non pas le noir en tant qu'absence, mais au contraire comme révélateur de la lumière. Toutes mes recherches scientifiques et artistiques tournent autour de l'invisibilité et de ce qui se trouve caché derrière... Pour l'artiste, et notamment le peintre, il ne fait aucun doute qu'il y a de la lumière derrière le noir. Le peintre et poète François Jacqmin a écrit : « L'ombre est une insatiable circonspection étoilée. » Je crois que la condition humaine est fondamentalement noire, mais cache une lumière qu'il faut aller chercher à travers des phases obscures de l'existence, telles la dépression, la mélancolie, la solitude. Toute lueur dans la nuit révèle la grandeur de la nuit. Jules Renard, dans ses carnets, a exprimé cela d'une façon laconique et superbe : « Tiens, les étoiles ! Il y a de la lumière chez Dieu. » L'un de mes recueils de poèmes s'intitule *Noir Soleil*... En ce qui concerne les distorsions entre le monde réel et le monde perçu, je me suis appliqué dans d'autres recueils, comme *Griphe*s, à torturer la phrase et la syntaxe pour en faire jaillir des sens multiples et nouveaux. Même chose avec la peinture : j'ai choisi l'encre de Chine et la gravure pour exprimer ce qui me fascine : l'exploration du noir et les distorsions de l'espace-temps. En pliant et dépliant des univers imaginaires, j'ai tenté des acrobaties architecturales pour créer le vertige du regard et dérouter la perception. Tous les éléments architecturaux sont immergés dans un océan noir, et l'interaction entre le clair et l'obscur procure peut-être la sensation de temps perpétuel. En répétant de façon obstinée des damiers noirs et blancs, j'ai aussi tenté d'évoquer la notion d'infini. L'infini, c'est bien l'aspiration de l'ange, celle qu'éprouve depuis toujours l'être humain retenu sur Terre par la gravitation... De même que la lumière est l'aspiration de l'être emprisonné dans le noir.

Le thème de « la lumière cachée au fond de l'ombre » ne relève pas que de l'expérience psychique. En astrophysique et en cosmologie, on retrouve la même problématique, et les exemples sont multiples ! C'est tout d'abord la nuit que l'on voit les étoiles, c'est-à-dire que l'on prend conscience de l'immensité cosmique. Ensuite, le « noir de la

nuît » est révélateur de toute l'évolution cosmique. En effet, si l'Univers n'évoluait pas, s'il contenait des étoiles éternelles brillant à l'infini, la nuit ne serait pas obscure mais éblouissante de la clarté ajoutée de toutes ses étoiles. Autre exemple : la cosmologie moderne nous a appris que la lumière était née de l'obscurité. Je fais allusion aux premiers temps de l'Univers, à l'époque où la lumière ne pouvait pas s'arracher à la matière, et où tout était noir. Dans son premier million d'années, nous disent les théories cosmologiques modernes, l'Univers était opaque. Pourquoi ? Parce que l'Univers était dominé par la lumière. Au cours de cette ère dire « radiative », l'Univers était en quelque sorte tellement lumineux que la lumière ne pouvait même pas jaillir. La raison est la suivante : à cette époque, la lumière était intimement mêlée à la matière, alors constituée exclusivement de particules élémentaires comme les protons et les électrons. Vous savez que la lumière, elle-même constituée de corpuscules appelés photons, interagit avec les particules – elle est déviée, absorbée, émise, etc. Or, au cours du premier million d'années de l'expansion cosmique, l'Univers était si dense que la lumière interagissait constamment avec les particules et ne pouvait pas se propager librement. Elle restait confinée ! Il faut donc émettre quelques réserves sur le fameux *Fiat lux* biblique. La lumière fut, oui, mais il fallut un million d'années d'opacité ! Puis, en se diluant encore, l'Univers est subitement devenu transparent et a laissé échapper sa première lueur. Quinze milliards d'années plus tard, nous captons l'écho de cette lueur, en provenance de toutes les directions du ciel. C'est ce que l'on appelle le « rayonnement de fond cosmologique ».

Il est tout aussi fascinant de constater que la question du destin ultime de l'Univers se ramène à mesurer la quantité de matière noire⁵. En effet, on sait aujourd'hui que la masse de l'Univers est largement dominée par de la matière invisible, constituée de corps massifs non lumineux qui, par leur action gravitationnelle, gouvernent la dynamique cosmique.

Dernier exemple : si j'ai travaillé pendant dix ans sur les trous noirs, c'est parce que j'étais motivé par le désir d'en révéler l'apparence lumineuse. On croit aujourd'hui qu'ils sont responsables des phénomènes les plus lumineux de l'Univers, tels les quasars.

Nous voilà au cœur du paradoxe de l'ombre et de la lumière. La « lumière confinée » est une authentique expression poétique, qui peut résonner très fort en chacun d'entre nous par ses équivalences avec notre savoir intime. Et la science nous dit aussi : ainsi est le monde... Chercher la lumière derrière l'ombre revient à accepter totalement la vraie réalité, intérieure et extérieure.

Le peintre, lui, perçoit peut-être plus que tout autre créateur la problématique ombre/lumière. Regardons l'évolution de la peinture

occidentale. Selon moi, elle commence réellement au XIII^e siècle, en Italie, avec des artistes comme Cimabue et Giotto qui inventent de nouveaux traitements de la couleur, de la lumière, de l'espace. Au XIV^e, Ucello découvre la perspective, et un peu plus tard, dans les écoles du nord de l'Europe, la peinture à l'huile (attribuée à Van Eyck) se met à remplacer la fresque. Or l'huile, par sa douceur et par une nouvelle fusion des couleurs, permet de réaliser l'unité spatiale. La peinture atteint ainsi son point culminant aux XV^e et XVI^e siècles avec les écoles italiennes et flamandes, et des artistes tels que Lippi, Botticelli, Grünewald, Van der Weyden, Léonard de Vinci. Puis le déclin est rapide. À partir du XVII^e siècle l'obscurité – au propre et au figuré – envahit la peinture. Une raison purement pratique est que les peintres ont perdu le secret de la fabrication des couleurs, ce qui fait qu'aujourd'hui nombre de toiles de cette époque ont des teintes maussades et noircies. Mais je parle surtout de la lumière intérieure des tableaux. De profondes raisons culturelles et sociales ont sans doute joué pour expliquer cette chute de la peinture dans le noir... Peut-être les artistes n'ont-ils plus su capter la lumière intérieure ; en se contentant de dépeindre le plus fidèlement possible la nature extérieure, ils ont sombré dans l'académisme. Bien entendu il y a eu de formidables exceptions, tels Rembrandt, bien sûr, ou Georges de La Tour. Chez ce dernier, d'ailleurs, il est frappant de constater que les sujets baignent dans un océan de ténèbres parfaitement voulu et maîtrisé, qui fait justement ressortir la lueur d'un visage, d'un regard. Les historiens de l'art appellent ce style le « ténébrisme » ! Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que la peinture renaît enfin à la lumière, avec l'impressionnisme et l'art contemporain.

J'ai bien conscience d'être très réducteur en résumant ainsi l'histoire de la peinture, et de toute façon, tout ce qui relève du jugement esthétique n'engage que son auteur !

Science et culture

On m'a également souvent demandé comment concilier rigueur scientifique et liberté d'expression artistique. Je réponds : par la structure ! Mon goût prononcé pour la structure (au sens large) prend peut-être racine dans ma pratique des mathématiques et de la physique théorique, à moins qu'il ne l'ait suscitée... Ce goût se retrouve à l'évidence dans mes dessins, mais aussi, de façon plus déguisée – inscrite en quelque sorte dans le rythme de la phrase – dans mon style d'écriture. Cette jouissance de la structure est enrichie par l'intuition, voire le hasard. L'art, tout comme la science, a tout à gagner à se soumettre à des règles dont la rigidité interdit l'à-peu-près et le flou. Cela n'exclut pas certaines obscurités (je pense par exemple

à la poésie de Mallarmé), à condition que l'artiste se refuse à les commenter (il y a des exégètes pour cela). Si le point de départ d'une œuvre est souvent une conjonction de hasard et d'intuition, c'est par un travail lucide et difficile de « mise en structure » qu'elle prend vraiment corps. Réflexion/intuition, intelligence/instinct me semblent être les pôles antagonistes et complémentaires qui gouvernent la créativité.

Pour autant, la créativité scientifique se manifeste plus tard dans la vie d'un individu que la créativité artistique, car la structuration mentale qu'elle requiert est plus élaborée et demande plus de temps à se mettre en place. Il y a eu des artistes de premier plan dont la créativité s'est manifestée dès l'enfance, notamment chez les musiciens, tandis que la précocité scientifique est extrêmement rare. J'ai pu observer aussi que, si l'on pratique les deux disciplines, les périodes de créativité dans l'une et l'autre alternent, comme aussi le temps du « faire » et celui du « réfléchir » sur sa propre création. Ainsi, exercer une double activité scientifique et artistique s'avère passionnant, car on est toujours porté au mouvement, toujours porté par des interrogations et des projets.

Y a-t-il interpénétration des concepts entre science et culture ? Oui, dans une certaine mesure. Comme le rappelait Erwin Schrödinger, il ne faut jamais oublier que l'ensemble de la science est lié à la culture humaine en général. Les découvertes scientifiques, même celles qui paraissent les plus avancées et difficiles à comprendre, sont dénuées de signification en dehors de leur contexte culturel. Les concepts et les mots pertinents de la science théorique sont tôt ou tard destinés à être exprimés en concepts et en mots qui ont un sens pour le public instruit, et à s'inscrire dans une image générale du monde.

Il peut aussi y avoir un flux inverse, à savoir un transfert de concepts purement artistiques vers la science. De nombreux artistes semblent avoir eu des intuitions fulgurantes de découvertes scientifiques postérieures. Pendant longtemps, cette idée m'a agacé, mais en y regardant de plus près j'en reconnais aujourd'hui la valeur. Je me suis d'ailleurs occupé à préparer une anthologie de poésie rassemblant des textes d'une étonnante prémonition scientifique⁶. Le poète et mystique soufi Isfahânî écrivait par exemple au XIII^e siècle que si l'on coupait un atome, on y trouverait un système solaire en miniature : « Il est un soleil caché dans un atome : soudain, cet atome ouvre la bouche. Les cieux et la terre s'effritent en poussière devant ce soleil lorsqu'il surgit de l'embuscade. » Il précisait que chaque atome recelait une force capable de réduire le monde en cendres. Parler de fission nucléaire au temps de saint Louis, c'est proprement stupéfiant !

Peut-être même existe-t-il des aires de rencontre encore plus

profondes. Quand la science moderne forge des concepts comme celui de « trou noir » et explicite qu'il est « gardien de la lumière », elle se dote déjà d'un procédé poétique. Il n'est pas nouveau pour la science de se nourrir d'imaginaire. Quand Démocrite parlait des atomes au V^e siècle av. J.-C., il se situait déjà au niveau de l'imaginaire, et ce mélange de rationalité et d'imaginaire a duré jusqu'au XVIII^e siècle. Ensuite, la science est passée par une phase nécessaire de réductionnisme, où l'imaginaire a en quelque sorte été évacué. Au regard de toute l'histoire des sciences, qui remonte à deux mille ans, cette période dite « positiviste » qui, en évacuant l'imaginaire a instauré une certaine forme de froideur, n'a que très peu duré. Mais comme nous en sortons à peine, elle est encore présente dans nos esprits et nos pratiques.

On peut par exemple se demander pourquoi le savoir en tant que tel (et son enseignement) est si souvent pratiqué de façon froide, dépourvue d'émotion. Or la connaissance touche à l'émerveillement, à l'enchantement au monde ! Pourquoi alors ne pas essayer de rapprocher le savoir et l'émotion ? Cela demande toute une maturation personnelle, sans doute à cause des habitudes réductionnistes dont nous sommes encore imprégnés. J'avoue que j'ai longtemps répugné à mêler les deux, car je craignais de tomber dans l'amalgame, le nivellement et le mélange des genres, que je déteste. Aujourd'hui, je conçois qu'une intégration harmonieuse est possible. J'ai par exemple participé à la conception d'un spectacle musical et astronomique, mêlant des rythmes délivrés par des étoiles à des percussions jouées par des hommes. Cette œuvre mixte traite d'ailleurs du thème « ombre et lumière », puisqu'elle s'intitule *Le Noir de l'Étoile*⁷.

Je voudrais conclure en ajoutant que l'émotion est souvent donnée par la surprise. Pensons à la surprise amoureuse ! Or, tant dans la recherche artistique que scientifique, la surprise est motrice. Celui qui n'est jamais surpris est atrophié et stérile, quel que soit son domaine d'activité. Finalement, le créateur idéal est peut-être l'enfant. L'enfant est par nature un artiste et un scientifique primitif, soumis à une dévorante curiosité pour le monde. Il vit passionnément, pose toutes sortes de questions, il crie, il chante, il peint, il sculpte, il construit. Souvent, à l'âge adulte, presque tout est balayé. L'esprit se ferme à l'interrogation, excepté à une gamme d'expériences extrêmement réduite. Cela, l'artiste et le scientifique doivent le refuser de tout leur être.

1- Adapté d'une interview par Ilke Angela Maréchal, parue en 1994 dans *Sciences et Imaginaire*, Paris, Albin Michel.

2- *Infinitement courbe*, film vidéo de 52 minutes écrit par L. Delesalle, M. Lachière-Rey et J.-P. Luminet, La Sept/Arte et Pandore production, 1994.

3- Big Bang : modèle cosmologique d'après lequel l'Univers a connu dans un passé remontant à environ 15 milliards d'années, des conditions de température et de densité très élevées, qui se sont par la suite atténuées au cours de l'expansion cosmique.

4- Ce qui n'est nullement contradictoire avec la relativité générale qui nous dit que l'espace-temps est courbe ; ce dernier est de toute façon *localement* courbe, par exemple déformé par la masse d'une étoile, d'un trou noir, d'une galaxie, etc.

5- Si la densité moyenne de l'Univers dépasse une certaine quantité critique, l'expansion de l'Univers cessera un jour et l'Univers se contractera. Si au contraire elle est en dessous, l'expansion se poursuivra à jamais. Le recensement de la matière noire dans l'Univers permet donc de mieux se situer par rapport à la quantité critique.

6- Elle a été publiée en 1996 sous le titre *Les Poètes et l'Univers*, au Cherche Midi.

7- Voir l'article « *Le Noir de l'Étoile* : la musique des pulsars », p. 408 [Note ajoutée pour la présente édition].

Espaces parallèles en science et dans les arts visuels¹

Qui dit représentation de l'espace dit géométrie. Pour commencer, je parlerai donc de l'invention même de la géométrie, au temps des Grecs, et de l'utilisation des sphères et des polyèdres pour représenter l'architecture de l'Univers. Ensuite, j'aborderai le monde des illusions d'optique et des figures dites « impossibles », qui mettent en jeu les limitations de notre système visuel. Puis, je traiterai la notion d'« espace élastique », dont l'introduction en physique, à travers la relativité générale d'Einstein, a marqué une grande révolution dans nos conceptions scientifiques sur la structure de l'Univers. J'aborderai notamment les thèmes des distorsions de l'espace-temps engendrées par les trous noirs et le Big Bang. Je mentionnerai quelques grands principes de symétrie utilisés dans les représentations de l'espace aussi bien scientifiques qu'artistiques. Je m'attarderai plus particulièrement sur les problèmes de pavage des espaces et je finirai sur les modèles d'« univers chiffonné », sortes de mirages cosmiques généralisés sur lesquels je travaille depuis quelques années, et qui modifient radicalement le rapport entre l'espace réel et l'espace perçu.

Sphères, polyèdres et cosmos

Si nous ouvrons un dictionnaire et que nous cherchons la définition du mot : espace, nous trouvons ceci : « étendue indéfinie qui contient tous les objets ». C'est une définition assez vague qui correspond à celle que les Grecs pouvaient se donner il y a plus de deux mille ans. Il est clair cependant que les physiciens et les mathématiciens, aussi bien que les artistes, ont besoin d'une définition plus précise. Les règles qui permettent de définir et de décrire l'espace sont celles de la géométrie. Il s'agit de la branche des mathématiques qui s'occupe non seulement des propriétés des figures dans l'espace, mais aussi des propriétés de l'espace lui-même. Selon la légende, la géométrie a été fondée au VI^e siècle av. J.-C. par Thalès de Milet. À cette époque, nombre de philosophes grecs accomplissaient une sorte

de voyage initiatique en Égypte, source de la civilisation. Thalès aurait inventé la géométrie en observant les triangles d'ombre portés par les grandes pyramides : il aurait eu l'idée de mesurer la hauteur des pyramides en mesurant la longueur de leur ombre au moment précis de la journée où la longueur de l'ombre de son propre corps était égale à sa hauteur réelle. On reconnaît là le théorème des triangles semblables.

À partir de Thalès, les règles de la géométrie élémentaires vont se développer. Chacun sait qu'elles ont été portées à un premier point de perfection par Euclide, qui œuvra à Alexandrie au III^e siècle av. J.-C. Les *Éléments* d'Euclide, conservés par les Arabes après la destruction d'Alexandrie, puis redécouverts en Occident et traduits au début du Moyen Âge, ont eu une grande influence à la Renaissance. Influence sur les mathématiques et la géométrie, bien entendu, mais aussi sur l'art, puisque c'est sur les théorèmes des *Éléments* que sont fondées les règles de la perspective... Influence également sur la cosmologie, la science qui traite de la représentation de l'Univers dans sa globalité. Les premiers Grecs, dont Thalès, ont élaboré des systèmes du monde, c'est-à-dire qu'ils ont tenté de bâtir une véritable architecture cosmique et de représenter géométriquement l'organisation de l'Univers... Platon et Aristote ont notamment énoncé des lois générales visant à décrire l'organisation du système du monde. Ces systèmes sont fondés sur des considérations géométriques, plus précisément sur des principes de symétrie. Cette idée purement « esthétique » se retrouve tout au long de l'histoire des sciences physiques : l'organisation de l'Univers est supposée obéir à des principes de beauté, et la beauté s'exprime par la symétrie, les « justes proportions ». Dans le *Timée*, Platon discute des symétries de la nature, et de la façon dont ces symétries peuvent expliquer l'organisation du cosmos. Il considère en premier lieu la figure parfaite entre toutes, la sphère. En effet, on peut faire tourner la sphère dans n'importe quel sens, elle ne change pas d'aspect. Dans le langage géométrique moderne, on dit que la sphère est invariante sous le groupe des rotations continues de l'espace à trois dimensions. Platon discute ensuite d'autres figures régulières, mais pas aussi parfaites que la sphère : les polyèdres réguliers. Ces figures sont invariantes sous certaines rotations de l'espace, mais pas sous toutes. Prenons par exemple un cube. Pour qu'il reste exactement identique à lui-même, vous ne pouvez pas le faire tourner de n'importe quel angle. Il faut trouver l'angle précis (en l'occurrence 90 degrés) qui ramène une face exactement à l'identique, et cela dans les trois directions.

Platon généralise donc les idées de symétrie à toute l'organisation de l'Univers. Il propose un modèle qui va rester fermement ancré pendant pratiquement 2 000 ans dans l'histoire de la physique, à

savoir que : premièrement, pour représenter le ciel, habitacle des Dieux, donc nécessairement parfait, il faut se fonder sur un système de sphères emboîtées. D'ailleurs, ne voit-on pas des cercles dans le ciel en observant le mouvement des astres ? Deuxièmement, tout ce qui se déroule ici-bas, sur Terre, est imparfait. Les êtres vivants naissent, vieillissent et meurent. Les corps matériels s'altèrent. Pour représenter l'imperfection du monde terrestre, Platon utilise les polyèdres réguliers... Une découverte géométrique très importante, connue de Platon, nous apprend qu'il n'existe que cinq polyèdres réguliers possibles : le tétraèdre (ou pyramide) ; l'hexaèdre (ou plus simplement le cube) ; l'octaèdre, qui a huit faces triangulaires ; l'icosaèdre, qui a vingt faces triangulaires ; et enfin le dodécaèdre, avec douze faces pentagonales... Partant de là, Platon a associé les polyèdres aux cinq éléments constitutifs du monde matériel, à savoir le feu, la terre, l'air, l'eau et la quintessence. L'idée de Platon, développée par Aristote, sera adoptée pendant des siècles pour fonder la cosmologie de l'âge classique. Dans le ciel, c'est-à-dire dans le monde supralunaire, règne la perfection symbolisée par des sphères et des cercles. Dans le monde sublunaire (de la Terre à la Lune) règnent l'imperfection et le changement, caractérisés par les éléments – de bas en haut : terre, eau, air, feu, quintessence, représentés géométriquement par les polyèdres réguliers.

Les représentations de polyèdres se trouvent dans toute l'histoire de l'art. Dans le livre très fameux de l'humaniste Luca Pacioli, *De la divine proportion* (1509), les gravures ont été réalisées par Léonard de Vinci et une partie du texte a été rédigée par Piero della Francesca. À cette époque, l'interaction était très forte entre les artistes, qui réfléchissaient sur la meilleure façon de représenter la nature, et les mathématiciens, qui développaient les grands principes de la géométrie euclidienne. L'invention de la perspective date de cette période.

Un auditeur : Pouvez-vous nous parler un peu de la quintessence ?

J.-P. L. : La quintessence est ce que plus tard on appellera l'éther, c'est-à-dire le milieu immatériel dans lequel baignent les éléments. J'y reviendrai plus loin car la notion s'est transformée au cours de l'histoire, et joue encore aujourd'hui – bien que sous une autre forme appelée « énergie du vide » – un rôle capital dans nos modélisations cosmologiques.

Permettez-moi d'abord de poursuivre la description du système du monde aristotélicien, qui a été perfectionné sur le plan astronomique par Ptolémée au II^e siècle ap. J.-C. Ce fameux système, qui place notamment la Terre au centre de l'Univers et les planètes selon des orbites circulaires autour de la Terre, tiendra jusqu'au

XVI^e siècle... comme l'illustre fort bien cette gravure de 1544.

L'élément terre est au centre, au-dessus l'eau, puis l'air, et le feu... Le premier cercle que l'on rencontre en s'élevant est celui de la lune. À partir de là, on trouve un ensemble de sphères emboîtées les unes dans les autres, représentant les orbites des différents corps célestes, tous censés tourner autour de la Terre... Le Soleil, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Ce sont les seules planètes visibles à l'œil nu. Au-delà, il y a la voûte étoilée, appelée sphère des fixes. En effet, les étoiles étaient censées ne jamais changer et être toutes situées à la même distance, semblables à des clous dorés fixés sur une immense sphère de cristal qui englobait le monde. Hormis le mouvement de rotation général, elles se trouvent toujours dans la même position relative, c'est pour cela que les Anciens les ont regroupées en constellations, avec des figures bien connues comme la Grande Ourse, Cassiopée, Orion, etc. L'immuabilité du ciel des fixes allait bien dans le sens de la perfection : ce qui ne change jamais est nécessairement parfait. En revanche, les planètes se déplacent légèrement au cours de l'année, par rapport au fond d'étoiles fixes. L'étymologie du mot planète signifie précisément « astre errant ».



Système du monde géocentrique selon Apianus (1544).

Un auditeur : Comment expliquaient-ils la nuit ?

J.-P. L. : En considérant que le Soleil passait de l'autre côté de la Terre. Pour les Anciens, la Terre ne tournait pas sur elle-même, mais c'était l'ensemble des corps célestes qui tournait autour d'elle, ce qui revient au même du point de vue des apparences et de l'alternance jour-nuit. On dit souvent que les Grecs croyaient que la Terre était plate, mais c'est tout à fait inexact. Déjà à l'époque de Pythagore, au VI^e siècle av. J.-C., les Grecs savaient que la Terre est ronde. Ératosthène, au III^e siècle av. J.-C., a même fait des mesures purement géométriques pour déterminer la circonférence de la Terre. Il avait entendu dire par des caravaniers que dans une ville du sud de l'Égypte nommée Syène (aujourd'hui Assouan, près de la frontière avec le Soudan), se trouvait un grand puits et qu'un certain jour de l'année, le Soleil, au zénith, dardait directement ses rayons au fond du puits. Ce jour spécial n'était autre que le solstice d'été, le 21 juin. Or Ératosthène savait que, dans sa ville d'Alexandrie, le même jour, à

midi, un bâton vertical avait une ombre. Courte, certes, mais une ombre. Si la Terre était plate, un tel écart ne se produirait pas. Ensuite, au moyen des règles de la géométrie euclidienne, Ératosthène a calculé cet angle formé par les rayons du Soleil avec la verticale. Il a trouvé 7,2 degrés, c'est-à-dire $1/50^e$ de cercle. Pour obtenir la circonférence de la Terre, il faut donc multiplier par 50 la distance qui sépare Alexandrie et Syène. Ératosthène aurait notamment interrogé les caravaniers pour leur demander combien de jours il fallait pour aller à dos de chameau de Syène à Alexandrie. À partir de ces données, il a déduit une valeur de la circonférence terrestre très proche de 40 000 kilomètres, qui est la valeur mesurée aujourd'hui par des moyens autrement puissants. Un véritable exploit intellectuel et pratique !

Le couronnement de l'astronomie sphérique de Ptolémée se matérialise dans un livre du XVI^e siècle qui est à la fois une œuvre d'art et une œuvre scientifique. *L'Astronomie des Césars*, écrite par l'astronome allemand Apianus, est dédiée à l'empereur Charles Quint et à son frère, le roi Ferdinand. Apianus a réalisé une sorte de livre-univers. À l'aide d'un ensemble de disques de carton amovibles, de règles graduées et de fils, il a construit des « instruments de papier » permettant de faire de l'astronomie pratique, par exemple calculer la position céleste de Mars en l'an 600 av. J.-C., la conjonction de Vénus en 1300 ou les éclipses de Lune et de Soleil.

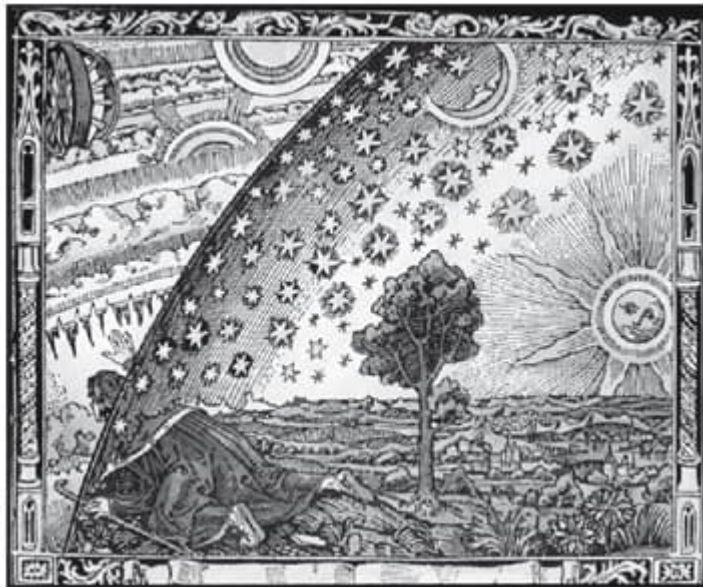
Ce livre date de 1540, c'est aussi la date à laquelle commence la première grande révolution astronomique. En Pologne, Copernic s'apprête à publier *De la révolution des orbes célestes*, où il propose un système du monde non plus centré sur la Terre mais centré sur le Soleil. La théorie de Copernic n'aura pas dans l'immédiat une grande influence ; il faudra à peu près un siècle et une succession d'événements astronomiques remarquables pour faire basculer le vieux système aristotélicien et aboutir à une nouvelle représentation du cosmos. L'un des premiers événements date de 1572. Dans la constellation de Cassiopée, une étoile nouvelle est apparue dans le ciel. Elle est restée visible, très brillante, pendant plusieurs semaines, ensuite elle a disparu. L'astronome danois Tycho Brahe a suivi l'évolution de cet astre et a fait des mesures précises pour aboutir à la conclusion qu'il s'agissait bien d'une étoile, et non pas d'une nouvelle planète, d'une comète ou d'un quelconque astre errant. Mais alors, comment une étoile nouvelle pouvait-elle apparaître dans la sphère des fixes réputée immuable ? Ce fut le premier coup sérieux à la représentation du monde en vigueur depuis Platon, Aristote et Ptolémée. D'autant qu'en 1609, Galilée utilise pour la première fois une lunette astronomique. Il découvre que la Lune n'est pas parfaite mais est de même nature que la Terre, avec ses cratères, ses

montagnes et ses vallées. Il découvre quatre satellites tournant autour de Jupiter, ce qui fait de Jupiter une sorte de système solaire en miniature... Le couronnement de cette révolution astronomique progressive, c'est Kepler. Ce génial théoricien était myope et ne pouvait donc faire d'observations astronomiques précises. À la place il faisait marcher son intellect et sa prodigieuse intuition. C'est lui qui a réussi le plus grand exploit de cette époque : en découvrant par le calcul la nature elliptique de trajectoires planétaires, il a réussi à débarrasser l'astronomie de la tyrannie des cercles et des sphères parfaites. Pendant huit ans, Kepler a analysé les observations de Tycho Brahe sur les positions étrangement changeantes de Mars. Ces mouvements apparents étaient précédemment expliqués par de complexes compositions de mouvements circulaires (la théorie des épicycles). Kepler a mis au jour la forme elliptique de l'orbite martienne, et a généralisé cette loi à l'ensemble des planètes dans le cadre du système héliocentrique.

Remarquons que cette révolution scientifique se déroule au même moment où l'ellipse fait son apparition dans l'architecture baroque : elle apparaît dans les voûtes d'églises baroques, notamment dans le sud de l'Allemagne. Voilà un autre exemple des conjonctions entre les représentations du monde élaborées par les scientifiques et les préoccupations esthétiques des architectes et plasticiens.

Un autre fait marquant de cette révolution astronomique est ce que l'historien des sciences Alexandre Koyré a appelé le « passage du monde clos à l'Univers infini ». Il n'était en effet plus possible de garder l'idée d'une sphère des fixes parfaitement immuable marquant la frontière d'un monde clos et petit. Il semblait dès lors que les étoiles devaient plutôt se répartir dans un espace très vaste, voire infini... Or l'espace infini ne pouvait se traduire, en termes mathématiques, que par l'espace euclidien, celui dans lequel les parallèles ne se recoupent qu'à l'infini, où la somme des angles d'un triangle est égale à 180 degrés, etc.

C'est donc avec des savants comme Patrizzi, Descartes et surtout Newton que pour la première fois de l'histoire, l'espace physique, « réel », sera identifié à un espace mathématique « abstrait ».



Monde clos ou univers infini ? Illustration de l'*Astronomie populaire*.

Cette gravure illustre de façon pittoresque le passage du monde clos à l'univers infini, en montrant un astronome qui désormais va regarder au-delà de la sphère des fixes, qui n'est plus dès lors que la sphère des apparences, pour découvrir les véritables mécanismes du monde.

Si la géométrie euclidienne n'a été considérée qu'assez tard dans l'histoire des représentations scientifiques de l'espace – au XVII^e siècle –, elle a été utilisée beaucoup plus tôt par les peintres de la Renaissance qui ont tenté de représenter fidèlement la nature, plus précisément de projeter une scène à trois dimensions sur un support à deux dimensions. Pour cela, il fallait des règles géométriques précises. C'est d'abord Brunelleschi, le fameux architecte du Duomo de Florence, qui a esquissé les règles de la perspective. Ces règles ont été formalisées en 1436 dans le traité *De la peinture*, d'Alberti. Œuvre capitale pour l'histoire de l'art, car Alberti donne là les règles formelles permettant de représenter correctement l'espace réel, et notamment l'impression de lignes ou de points à l'infini, à l'intérieur d'un cadre fini bidimensionnel. Plus généralement, on y trouve une tentative pour définir la beauté de façon rationnelle, à partir de l'idée qu'elle réside en l'harmonie réciproque des parties et du tout. Vous connaissez bien entendu le nombre d'or : c'est la recherche de la juste proportion. Celle-ci est définie de façon que le rapport entre la plus petite partie et la plus grande partie soit égal au rapport entre la plus grande partie et le tout. Passons sur les calculs, mais en bref c'est la solution d'une équation du deuxième degré, qui vaut 0,618.

Pratiquement toutes les œuvres d'art de l'époque, qu'il s'agisse d'arts graphiques à deux dimensions ou d'architecture à trois dimensions, sont fondées sur ce nombre d'or. Par exemple, les villas de Palladio (1508-1580) sont construites sur ce schéma et, au dire de leur propre créateur, elles « sonnent juste »...

Un artiste majeur de la Renaissance se trouve au cœur de toutes ces interrogations sur les rapports entre géométrie et espace réel. Il s'agit de Dürer (1471-1528). Il a notamment joué un rôle capital dans les recherches sur la perspective. C'est lui qui a importé dans les écoles du Nord les nouvelles règles issues de l'école italienne, et il les a lui-même approfondies à travers un traité de géométrie qu'il a écrit.



Le Perspectographe par Albrecht Dürer.

L'une de ses gravures symbolise ces recherches : il s'agit du *Perspectographe*, où l'artiste se représente lui-même en train de dessiner sur une feuille plane une femme nue, couchée dans l'espace tridimensionnel. Dürer interpose entre lui et le modèle un cadre quadrillé, qui préfigure les systèmes de coordonnées cartésiennes qui ne seront utilisés en mathématiques qu'au XVII^e siècle !

Albrecht Dürer, en 1515, a gravé sur bois les premiers planisphères représentant le ciel dans sa totalité. Ces planisphères ont ouvert la voie à un renouveau de l'uranométrie – discipline qui traite des cartes célestes. Les positions des étoiles sont fixées avec la précision du catalogue de Ptolémée. Les figures sont artistiquement dessinées, dans un style ne présentant aucune ressemblance avec les représentations antérieures des constellations. Dans sa carte de l'hémisphère Nord, Dürer a ajouté aux quatre coins les portraits imaginaires d'astronomes célèbres, représentant les nations dominantes qui avaient contribué à l'uranométrie : Aratus Cilix (le Grec Aratos), Manilius Romanus (le Romain Manilius), Ptolemeus Ægyptius (l'Égyptien Ptolémée) et Azophi Arabus (l'Arabe al-Sufi). La carte de l'hémisphère Sud est beaucoup plus sommaire, Dürer ne disposant d'aucune donnée sur les régions du ciel austral invisibles en

Europe.



Les planisphères célestes gravés par Dürer.

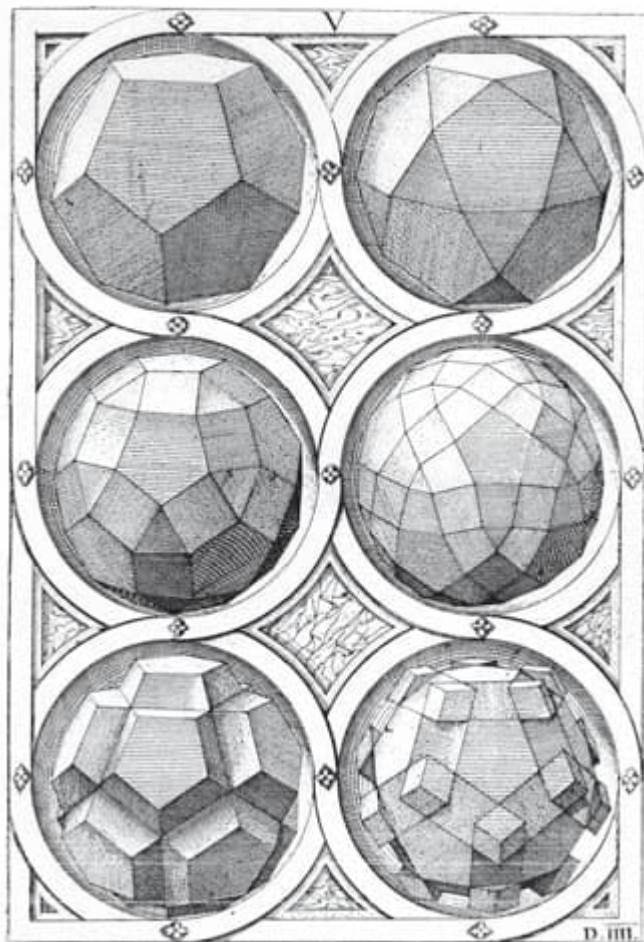
« En l'an de grâce 1492, le septième jour de novembre, aux environs de midi, survint un grand coup de tonnerre accompagné de déflagrations et d'éclairs, puis une pierre de deux cent soixante livres tomba des airs. Les savants eux-mêmes disaient qu'ils ne savaient pas ce dont il s'agissait et qu'une telle pierre tombant du ciel serait quelque chose de surnaturel. » L'événement est relaté par Sebastian Brant, poète et professeur à l'Université de Bâle. Cette chute céleste a

traversé un ciel couvert et sombre avant de s'abattre dans un champ de blé, près du village alsacien d'Ensisheim. Le seigneur de la ville, qui devait devenir l'année suivante le saint empereur romain Maximilien I^{er}, interpréta l'événement comme un signe de protection divine contre l'envahisseur turc ; il ordonna donc d'enchâsser l'objet dans l'église locale. Craignant que le talisman ne s'envole à nouveau vers le ciel pendant la nuit, les villageois enchaînèrent la pierre au mur de l'église. Plus tard, la météorite fut suspendue dans l'église d'Ensisheim sur ordre de l'empereur, qui la considérait comme un signe divin. Elle y resta jusqu'à la Révolution. Aujourd'hui c'est le trésor du village, exposé au musée de la Régence.



Roulements sourds, traînées de lumière lourde, glissade vertigineuse sur le tapis du ciel : au dos d'un panneau représentant saint Jérôme en pénitence, daté de 1494, Albrecht Dürer a peint le bolide d'Ensisheim. Dürer, jeune apprenti résidant alors à Bâle, fut témoin de sa chute. L'œuvre (voir [cahier 2, figure 2](#)), conservée au Fitzwilliam Museum de Cambridge, en Angleterre, est l'une des très rares représentations picturales d'une météorite dans l'histoire de l'art (les comètes, en revanche, sont légion). Plus tard, dans ses gravures de l'Apocalypse de Jean, Dürer représentera à maintes reprises des chutes de pierres enflammées.

Voici son œuvre connue sous le nom de *Melancolia*... Cette eau-forte, datée de 1514 d'après le carré latin qui y figure, évoque une rêverie sur la nature du monde selon un état de mélancolie que la vision médiévale associait à l'« humeur noire », à la dépression et à la planète Saturne. Le personnage ailé préfigure de façon troublante l'interrogation créative de Kepler sur l'usage des sphères et des polyèdres pour représenter l'harmonie secrète du monde. Dans le ciel luit un astre que l'on peut identifier à la grande comète de l'hiver 1513-1514. Tendant vers le signe zodiacal de la Balance, elle annonce, sinon la fin des temps, du moins l'achèvement d'un cycle du monde. L'échelle à sept degrés rappelle la croyance des Grecs byzantins selon laquelle l'âge du monde ne dépasserait pas 7 000 ans.



Variations sur le dodécaèdre par Jamnitzer.

Tout au long du XVI^e siècle vont se développer des études à la fois géométriques et artistiques sur les polyèdres. Voici un très beau livre publié à Nuremberg en 1568 : *La Perspective des corps réguliers*. Cet ouvrage de Wentzel Jamnitzer (1508-1585) est un chef-d'œuvre de l'art géométrique. Les gravures offrent d'étonnantes variantes sur les cinq corps platoniciens et des constructions en forme de polyèdres étoilés que Kepler décrira mathématiquement cinquante ans plus tard, en 1619. Le rapport que Kepler a entretenu avec les polyèdres est riche d'enseignements sur la façon dont fonctionne l'imaginaire créatif du savant, ce qui le rapproche en cela beaucoup de l'artiste. Tout novateur qu'il soit, Kepler est l'auteur de deux cosmogonies complètes dans l'esprit de l'Antiquité : *Mysterium cosmographicum* (*Le Secret du monde*) en 1596 et *Harmonices mundi* (*L'Harmonie du monde*) en 1619. À cette époque charnière entre Antiquité et pensée moderne, il reste

imprégné d'une tradition qui lie explicitement cosmologie et harmonie divine. Ce que Kepler cherche à retrouver n'est toutefois pas le mysticisme des nombres des pythagoriciens. Il prend pour point de départ les figures géométriques comme étant des « choses de raison ». Par sa volonté marquée de donner une explication rationnelle du monde, il fonde donc une démarche proche de celle des scientifiques modernes. Dans son *Secret du monde*, rédigé à l'âge de 25 ans, Kepler fait appel à la géométrie d'une manière originale pour résoudre le problème des rapports des orbites planétaires. Selon lui, les cinq polyèdres doivent correspondre exactement aux cinq intervalles entre les six planètes connues (Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne). Il inscrit un octaèdre entre les orbites de Mercure et de Vénus, un icosaèdre entre Vénus et la Terre, un dodécaèdre entre la Terre et Mars, un tétraèdre entre Mars et Jupiter, et un cube entre Jupiter et Saturne. Après de nombreux calculs, Kepler voit les solides platoniciens s'insérer les uns après les autres avec précision entre les orbites appropriées. Il démontre mathématiquement que les solides platoniciens s'agencent l'un dans l'autre d'une manière unique, selon une architecture en correspondance exacte avec celle du système solaire. Pour Kepler, cela ne saurait être un hasard : persuadé d'avoir découvert le « secret du monde », il interprète cette correspondance comme une manière nouvelle et rationnelle de rendre compte de l'harmonie fondamentale qui règne dans le ciel. Son imagination débordante lui suggère de prolonger cette référence à l'harmonie en faisant appel au sens du goût. Il entreprend le projet d'une « coupe cosmique », véritable distributeur de boissons choisies et préparées en correspondance avec les polyèdres et les harmonies planétaires. En février 1596, Kepler se rend à la cour de son protecteur, le duc Frédéric de Wurtemberg, pour le persuader de faire construire une maquette de l'Univers en forme de coupe. Les symboles des planètes seraient taillés dans des pierres précieuses : un diamant pour Saturne, une hyacinthe pour Jupiter, une perle pour la Lune, etc. La coupe verserait plusieurs breuvages, que des tuyaux dissimulés amèneraient de chaque sphère planétaire à sept robinets disposés sur le rebord. Mercure fournirait du marc, Vénus de l'hydromel, Mars un fort vermouth, et ainsi de suite. Le projet, trop coûteux, n'aboutit pas.

Kepler ne pourra jamais se détacher vraiment de cette vision du monde, même s'il abandonnera la stricte correspondance entre polyèdres et orbites planétaires en 1609, après avoir découvert que ces orbites, elliptiques et non pas circulaires, ne pouvaient s'insérer dans un tel schéma. C'est toutefois bien sa recherche passionnée d'une harmonie sous-jacente qui l'a aiguillé vers les trois lois des mouvements planétaires restées fameuses, et qui traduisent en quelque sorte la négation de son idée initiale. Plus tard, Kepler réutilisera les

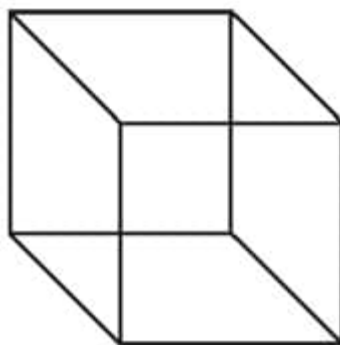
polyèdres pour décrire certains phénomènes naturels, notamment les cristaux. En observant des flocons de neige, il eut l'intuition que leur structure microscopique était fondée sur les polyèdres réguliers étoilés. À partir de là, Kepler écrivit le premier traité de cristallographie, *La Neige sexangulaire*.

Il n'est pas inutile de préciser qu'aujourd'hui encore, les physiciens théoriciens qui essaient d'élaborer des théories très compliquées décrivant les interactions fondamentales de la nature continuent à utiliser, non plus des sphères et des polyèdres, mais des groupes de symétrie – qui traduisent finalement la même chose : l'idée d'un ordre caché.

Les figures impossibles

Je vais momentanément interrompre le cours de l'histoire des représentations cosmologiques pour parler de figures qui, justement, désobéissent aux règles de la perspective pour créer des altérations de notre perception.

Deux catégories posent des problèmes à notre système visuel : les figures ambiguës et les figures impossibles.

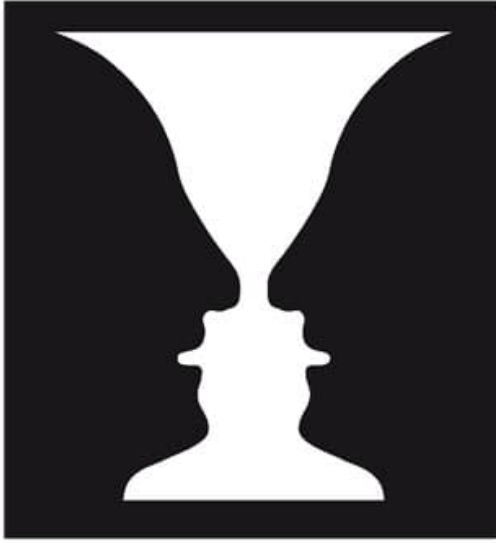


Le *Cube de Necker*, prototype de la figure ambiguë.

Les figures ambiguës ont été utilisées par un certain nombre d'artistes, notamment Vasarely. Vous reconnaissez ici un exemple très connu d'un motif cubique ambigu, que l'on peut percevoir à la fois convexe ou concave selon la façon dont on ajuste son système mental. Tout un mouvement artistique, celui de l'Optical Art, dont Vasarely est un exemple médiatisé, a utilisé ce genre de motifs.

Voilà une autre figure ambiguë bien connue appelée « vase de Rubin », dans laquelle on voit, soit une sorte de vase si l'on se concentre sur l'intérieur, soit deux visages qui se font face si l'on se concentre sur l'extérieur. Voici une autre figure ambiguë intitulée *Ma*

femme et ma belle-mère. Est-ce que vous voyez pourquoi ?



Deux figures ambiguës classiques.

Un auditeur : Une vieille femme et une jeune femme.

J.-P. L. : Exactement ! À noter que, quand on se fixe un certain temps sur l'une des deux images possibles, par exemple celle de la vieille femme, il devient de plus en plus difficile de passer à l'autre représentation. Il faut faire un effort mental plus grand. Salvador Dalí a magistralement utilisé des figures ambiguës dans nombre de ses toiles.



Triangle de Penrose.

Passons maintenant aux figures impossibles. En voici une appelée *triangle de Penrose*. C'est un objet tridimensionnel représenté en deux dimensions, mais on s'aperçoit que si on voulait réellement construire cet objet dans l'espace à trois dimensions, ce serait tout bonnement impossible.

Auditeur : C'est de quelle année ?

J.-P. L. : Je vais justement faire un bref historique de ces figures impossibles. En 1958, le jeune mathématicien Roger Penrose – qui est toujours vivant et en activité – travaillait avec son père qui, lui, était psychologue. En griffonnant de petits dessins sur une feuille de papier, il s'est aperçu qu'il avait trouvé un motif étrange ressemblant à première vue à un triangle, mais un triangle absolument impossible à construire dans l'espace normal. Les Penrose se sont demandé s'il s'agissait là d'une « découverte ». De quelle nature ? Mathématique ? Psychologique ? Finalement, ils ont publié un article décrivant plusieurs figures impossibles dans un journal de psychologie. En retour, ils ont été contactés par des artistes, notamment Mauritz Cornélius Escher, qui leur ont signalé qu'ils dessinaient depuis longtemps des figures impossibles, sans savoir qu'il s'agissait de choses mathématiques nouvelles et étonnantes !

Pourquoi une figure impossible pose-t-elle un problème particulier à notre système de perception ? Parce que, devant une figure impossible, notre cerveau se trouve aux prises avec deux propositions contradictoires : il « voit » clairement un objet, mais cet objet est un non-objet dans la mesure où on ne peut pas le fabriquer matériellement. Notre système mental est donc capable de se figurer des non-objets.

À la suite des recherches de Penrose, des historiens d'art s'y sont intéressés et ont découvert des figures impossibles, volontaires ou involontaires, dans des œuvres bien antérieures à la publication de cet article (par exemple chez Piranèse, Hogarth et Duchamp). Après avoir contacté Penrose, Escher a collaboré avec lui et produit de nouvelles œuvres qui intégraient leurs découvertes. C'est un exemple intéressant de transfert des connaissances des scientifiques vers les artistes. Ce transfert peut même fonctionner en sens inverse, puisque certaines estampes d'Escher, issues de ses recherches empiriques, ont permis à des mathématiciens de développer des branches nouvelles des mathématiques, notamment dans le domaine de la topologie.

Voici quelques gravures très connues d'Escher. Le *Mouvement perpétuel* utilise le triangle impossible de Penrose. La *Montée et descente* montre un escalier impossible, que l'on peut monter et descendre indéfiniment, tout en restant sur le même plan. Évidemment, toutes les figures impossibles trichent avec la représentation de l'espace et les règles de la perspective, mais c'est tellement bien fait qu'on ne s'en aperçoit pas facilement.



Deux célèbres gravures d'Escher : *Mouvement perpétuel*, *Montée et descente*.

Auditeur : Cela date de quand ?

J.-P. L. : Ces gravures d'Escher datent des années 1950-1960. Il existe plusieurs ouvrages intéressants sur l'œuvre d'Escher et sur son interprétation à la lueur des mathématiques. Par exemple *Escher, Art et Science* sont les actes d'un colloque tenu dans les années 1980. Le livre de Bruno Ernst, *Le Monde des illusions d'optique*, traite de façon détaillée des figures ambiguës et des figures impossibles.

Bruno Ernst a lui-même réalisé des figures impossibles. La photographie (voir [cahier 2, figure 3](#)), par exemple, restitue un triangle de Penrose comme s'il était réel, mais elle est truquée, le miroir révélant le trucage. L'œuvre date de 1985.

Pour clore ce chapitre sur les figures impossibles, j'ose vous montrer une de mes œuvres, une gravure de 1992 intitulée *Trou noir*, qui crée une illusion d'optique en violant de façon assez simple les règles de la perspective. Selon ces règles, si on représente la ligne d'horizon, les points de convergence à l'infini sont situés sur cette ligne... Si vous introduisez un troisième point de fuite non situé sur la ligne d'horizon, vous introduisez des déformations optiques. Dans mon dessin, j'ai effectivement introduit un point de fuite placé largement au-dessous de la ligne d'horizon, et qui donne l'illusion que le carrelage, pourtant rectiligne, est concave et incurvé, comme courbé sous le poids de la cathédrale en ruine qui pèse dessus.



Trou noir, encre de Chine de l'auteur (1982).

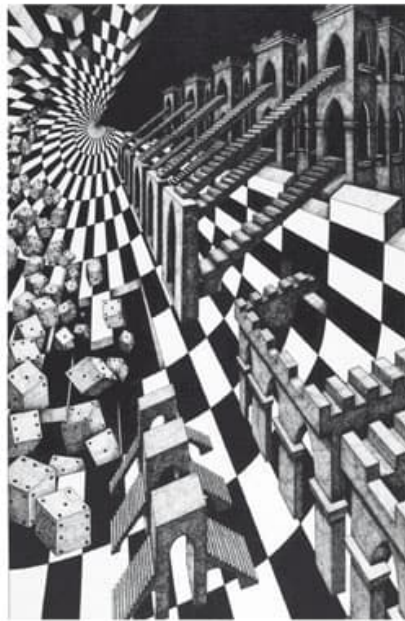
L'espace élastique

Cette gravure me permet de faire la transition avec mon troisième chapitre, celui qui traite de l'espace élastique. C'est un terme imagé pour aborder une théorie compliquée, la relativité générale d'Einstein, qui au début du XX^e siècle a complètement chamboulé les idées que l'on se faisait sur la nature de l'espace, du temps et de la gravité. En deux mots, elle traite de l'influence que la matière et

l'énergie exercent sur la forme même de l'espace, le rendant d'une certaine façon élastique.

Avant Einstein régnait la théorie de Newton, exprimée dans ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, publiés en 1687. Dans le système du monde newtonien, il y avait un espace défini *a priori*, existant de toute éternité, et dont l'étendue correspondait exactement à l'espace euclidien. La nature de cet espace était indépendante de tout observateur : la longueur d'une règle était la même pour tous, que l'on soit en mouvement ou au repos par rapport à la règle. De même pour les intervalles de temps. Espace et temps absolus formaient donc un cadre préétabli, à l'intérieur duquel il s'agissait de décrire le mouvement des corps matériels à l'aide de la mécanique. Nous avons tous appris les lois de la physique newtonienne à l'école, notamment la loi de l'attraction universelle supposée décrire la gravité. Au début du XX^e siècle, les progrès de la physique ont indiqué aux chercheurs qu'il fallait changer de représentation. Il fallut notamment abandonner l'idée que les mesures d'espace et de temps étaient absolues. En d'autres termes, lorsqu'une règle ou une horloge sont en mouvement relatif par rapport à l'observateur à une vitesse importante, disons proche de celle de la lumière, la mesure des intervalles d'espace et de temps est élastique. Les longueurs se contractent et les temps se dilatent. Il faut donc bien abandonner les notions de temps absolu et d'espace absolu, existant indépendamment de l'observateur. La théorie de la relativité propose ainsi un mariage subtil entre l'espace et le temps, qui donne l'espace-temps, et de plus, les corps massifs confèrent à cet espace-temps des propriétés géométriques nouvelles, qui ne sont plus euclidiennes.

Pour vous permettre de mieux visualiser ce dont je vous parle, je vous ai apporté une pièce de tissu élastique (en l'occurrence un morceau de bas résille) qui figure l'espace-temps réduit à deux dimensions. Si je place une boule représentant un corps massif comme une étoile, il est clair que le tissu s'incurve autour de la boule. Or la masse engendre la gravitation. Donc, en relativité générale, la gravitation n'est pas le résultat d'une force attractive mystérieuse émise par le Soleil, ce n'est qu'une manifestation de la géométrie courbe de l'espace-temps. La démarche est on ne peut plus platonicienne : le phénomène purement physique de la gravitation est complètement géométrisé. C'est pour cela que la théorie de la relativité générale exige un nouveau cadre mathématique, qui est celui des géométries non euclidiennes, découvertes au XIX^e siècle. Un certain nombre de mathématiciens tels que Gauss, Riemann et Lobatchevski avaient en effet imaginé l'existence possible d'espaces abstraits différents de l'espace euclidien, en l'occurrence des espaces courbes.



Deux lithographies de l'auteur.
À gauche : *Chronos* (1993), à droite : *Big Bang* (1992).



Espace-Temps-Matière, lithographie de l'auteur (1993).

Pour visualiser la forme d'un espace courbe, la lumière joue un rôle fondamental, en ce sens que ses trajectoires épousent toujours la

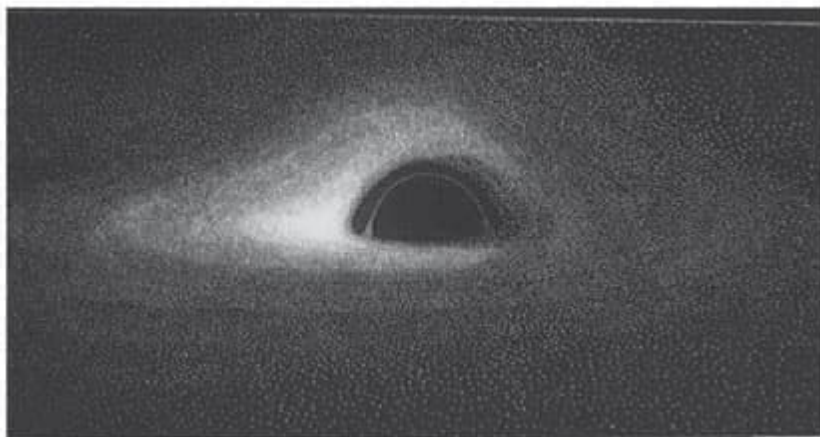
forme naturelle de l'espace, ce qui permet d'en faire une sorte de maillage visualisable. Plus précisément, la lumière emprunte toujours le plus court chemin pour aller d'un point à un autre, ce que l'on appelle une géodésique. Dans l'espace ordinaire, qui n'a pas de courbure, les rayons lumineux se propagent en ligne droite ; l'espace euclidien est donc tissé par un réseau rectiligne, semblable à ce morceau de bas résille plat. Dès que je considère un corps massif, le Soleil par exemple, de la courbure s'introduit et modifie la forme du tissu. Ce que l'on pourra vérifier en observant que les trajectoires des rayons lumineux sont déviées en passant près du Soleil. L'expérience a été faite dès 1919 lors d'une éclipse totale de Soleil.

Dans la théorie de la relativité générale, plus un corps est massif, plus la courbure de l'espace-temps qu'il engendre est importante. Les astrophysiciens ont imaginé un type d'astre capable de causer une déformation tellement profonde du tissu élastique de l'espace-temps qu'il engendre un puits dont rien ne peut sortir : c'est un trou noir. Les rayons lumineux eux-mêmes – qui suivent toujours la trame du tissu – sont capturés au fond du trou noir. S'ils pénètrent dans une zone critique marquant la surface du trou noir, tous les objets matériels sont capturés : les particules, les fusées, les cosmonautes.

Dans ma propre démarche artistique, j'ai voulu représenter de façon symbolique le mariage relativiste entre espace, temps et matière à travers une série de gravures... Celle que je vous ai déjà montrée, intitulée *Trou noir*, représente l'espace courbe, creusé par le puits vertigineux d'un trou noir. La gravure suivante, *Chronos*, représente plutôt le temps et les phénomènes d'irréversibilité qui lui sont liés... La suivante, *Big Bang*, représente la génération et la structuration progressive de la matière au cours de l'histoire cosmique. Enfin, *Espace-Temps-Matière* regroupe, toujours de façon symbolique, des éléments des trois précédentes. L'oiseau représente l'envol d'une nouvelle physique, la physique relativiste et quantique...

En regardant maintenant une vraie photographie du ciel (voir p. 190) qui montre une manifestation optique engendrée par la courbure de l'espace : un mirage gravitationnel, qui matérialise en quelque sorte à nos yeux (équipés de grands télescopes) la courbure relativiste. Dans un mirage gravitationnel, la lumière d'une source lumineuse très lointaine (quasar ou galaxie) est déviée par la masse d'un objet (amas de galaxies) situé plus près sur la même ligne de visée. Il en résulte multiplication, amplification, ou déformation de l'image de la source. Ce cliché du télescope spatial Hubble révèle plusieurs objets bleutés de forme incurvée, qui sont les images multiples de la même galaxie. Cette illusion d'optique est créée par un amas de galaxies situé au centre de la photographie, de couleur jaune. Son gigantesque champ gravitationnel agit comme une lentille

optique : la lumière qui le traverse est déviée, si bien que l'image des objets plus lointains situés derrière l'amas est démultipliée, amplifiée et distordue. Dans ce cliché, la lumière émise par la galaxie lointaine, une spirale, s'est divisée en cinq faisceaux en traversant l'amas. L'une des cinq images résultantes est proche du centre, les autres sont réparties autour. Chaque image de la spirale est incurvée en forme d'arc. L'amas jouant le rôle de lentille est situé à 5 milliards d'années-lumière, dans la constellation des Poissons, tandis que la galaxie bleue se trouve environ deux fois plus loin.



Trou noir entouré d'un disque de gaz, simulation numérique de l'auteur (1979).

Voici maintenant les distorsions optiques les plus extrêmes engendrées par la courbure de l'espace, celles provoquées par les trous noirs. Aucun trou noir n'a été observé d'assez près pour en obtenir des images photographiques. Ces images sont donc le résultat de calculs d'ordinateur. Un aspect qui m'a toujours particulièrement intéressé dans la recherche scientifique concerne justement tout ce qui pose un problème de visualisation. L'exemple type est bien sûr celui du trou noir. Par sa nature même, le trou noir est invisible : il ne laisse échapper ni matière ni lumière. On ne peut en comprendre toutes les propriétés qu'en résolvant les équations appropriées de la relativité générale (et cette compréhension est hélas réservée aux seuls spécialistes). Si l'on veut malgré tout en donner une représentation, on peut imaginer que le trou noir est entouré de gaz chaud, qui l'éclaire d'une certaine façon et révèle la présence de l'invisible. Cette question a constitué l'un de mes premiers travaux de recherche. À la fin des années 1970, j'ai calculé par ordinateur une « photo-graphie virtuelle » de trou noir. Aujourd'hui, il est possible d'observer des trous noirs indirectement, c'est-à-dire par les effets qu'ils causent sur leur environnement : leur puissant champ gravitationnel aspire la

substance gazeuse des étoiles voisines en d'étranges tourbillons, appelés « disques d'accrétion ». Ces phénomènes ont été détectés dans certains systèmes d'étoiles doubles émettant du rayonnement X et au centre de nombreuses galaxies.

L'image montre comment l'on verrait un trou noir entouré d'un disque de gaz. Les images subissent des déformations optiques extraordinaires, dues à la déviation des rayons lumineux. Tout cela s'explique parfaitement par la relativité générale. Prenons un trou noir et un mince disque de gaz vus par la tranche, ainsi qu'un observateur lointain (ou une plaque photographique si l'on désire immortaliser la chose). Dans une situation ordinaire, c'est-à-dire dans l'espace euclidien, la courbure est faible. C'est le cas du système solaire où l'on observe la planète Saturne entourée de ses somptueux anneaux, avec un angle de vision légèrement au-dessus du plan. Bien sûr, une partie des anneaux est cachée derrière la planète, mais on complète aisément par la pensée leur tracé elliptique. Autour d'un trou noir, il en va tout à fait différemment à cause des déformations optiques dues à la courbure de l'espace-temps. Notamment, on aperçoit le dessus du disque dans sa totalité, quelle que soit l'inclinaison du regard. L'arrière du disque n'est pas caché par le trou noir, car les images qui en proviennent sont en quelque sorte relevées par la courbure de l'espace et atteignent l'observateur lointain. Beaucoup plus étonnant, on voit également le dessous du disque gazeux. En effet, les rayons lumineux qui normalement se propagent vers le bas, dans une direction opposée à celle de l'observateur, remontent vers le haut et fournissent une « image secondaire », vision très déformée du dessous du disque. En théorie, il existe une image tertiaire qui donne une vue du dessus distordue (après que les rayons lumineux ont accompli trois demi-tours), puis une image d'ordre 4 qui donne une vue du dessous plus écrasée encore, et ainsi de suite à l'infini.

Auditeur : Comment se fait-il que cette matière lumineuse ne soit pas attirée par le trou noir ?

J.-P. L. : Mais elle l'est, précisément ! Elle est attirée en un mouvement de spirale, mais comme le disque est constamment régénéré par de la matière fraîche, on a l'impression d'observer une forme stable. En tenant compte également des propriétés physiques du disque gazeux : rotation (qui donne la dissymétrie droite gauche du flux lumineux), température, émissivité, on obtient une simulation de l'apparence photographique d'un trou noir entouré d'un disque de gaz lumineux.

La [figure 4 du cahier 2](#) montre les simulations numériques les plus perfectionnées que l'on puisse faire aujourd'hui à l'ordinateur. Il s'agit d'une succession d'images calculées qui reproduisent le plus fidèlement possible différentes images d'un trou noir lors d'un voyage

spatial que nous pourrions faire en pensée. Imaginons un explorateur cosmique qui a repéré un gros trou noir au loin par le hublot de son vaisseau spatial. Fasciné par le spectacle, il décide de plonger dans sa direction et de s'engouffrer à l'intérieur, sachant toutefois qu'il ne pourra plus en ressortir. Il oriente son vaisseau en direction du trou noir, coupe les moteurs de façon à tomber en chute libre, et observe le spectacle par le hublot avant, dans la direction de son mouvement. La série de clichés montre les instantanés pris par notre intrépide explorateur à différentes étapes du plongeon le long de sa trajectoire. La dernière image est prise de l'intérieur du trou noir, le photographe ayant dû pivoter de 180 degrés et regarder par le hublot arrière pour voir une dernière fois les images démultipliées et très déformées du disque d'accrétion. Contrairement à une opinion courante, à l'intérieur d'un trou noir il ne fait pas noir, puisque les rayons lumineux y pénètrent.

Auditeur : Le trou noir a-t-il un centre ?

J.-P. L. : Un centre géométrique, oui. Je vais vous en parler.

Auditeur : Pourquoi n'y a-t-il pas de lumière dans le trou noir, vu qu'il y en a qui entre ?

J.-P. L. : Parce que l'on continue à regarder vers l'avant. On tourne le dos à l'Univers, on tourne le dos à la lumière. Mais il suffit de se tourner par le hublot arrière pour voir l'univers extérieur, bien qu'on ne puisse plus jamais y retourner...

Auditeur : On est dans l'espace, dans le temps, ou quoi ?

J.-P. L. : On est toujours dans l'espace-temps, mais c'est un espace-temps très bizarre dans la mesure où l'espace joue en quelque sorte le rôle du temps. On est irrésistiblement attiré vers un point de l'espace, qui est le centre du trou noir, de la même manière que, dans l'univers ordinaire, on est irrésistiblement attiré dans le temps vers le futur : il n'y a pas de retour en arrière possible. À l'intérieur d'un trou noir, il y a une sorte d'inversion de l'espace et du temps, c'est-à-dire que l'espace devient « inexorable ».

Auditeur : C'est un peu l'idée d'Herbert George Wells avec sa machine à explorer le temps, il est toujours dans le même espace et c'est le temps qui change.

J.-P. L. : En effet. Wells lisait la littérature de vulgarisation scientifique ; dans ses romans et nouvelles, on trouve une influence importante de ces lectures. Cependant, son roman *La Machine à explorer le temps* date, si je ne m'abuse, de 1895, une époque où la relativité d'Einstein n'avait pas encore été inventée ! Mais il est vrai que l'on trouve ailleurs l'influence de la relativité dans la littérature et l'art de l'époque. Duchamp, par exemple, a tenté d'intégrer la quatrième dimension, celle du temps, dans sa fameuse toile, *Nu descendant un escalier*. Il représente dans le même espace la

décomposition du mouvement au cours du temps.

Auditeur : Qu'est-ce qu'il y a comme matière à l'intérieur ? Je croyais que le trou noir était une étoile effondrée...

J.-P. L. : C'est exact.

Auditeur : Donc, la matière devient très dense... et elle reste dans le trou...

J.-P. L. : Effectivement, le grand mystère qui subsiste encore aujourd'hui avec la théorie des trous noirs, c'est le destin de la matière qui y tombe. Où va-t-elle ? Reprenons notre tissu élastique. Si nous creusons un puits suffisamment profond pour simuler un trou noir, qu'advient-il au fond ? Y a-t-il un « nœud » qui bloque l'espace-temps (ce qu'en mathématiques on nomme une « singularité », où la courbure devient infinie), ou bien le tissu est-il « percé » ? Dans ce dernier cas, l'ouverture est-elle un trou béant, ou s'apparente-t-elle à un « passage vers l'ailleurs » ? Comment agissent les distorsions spatio-temporelles sur le tissu élastique ? Seules les solutions mathématiques de la relativité générale peuvent nous guider. La possibilité la plus spectaculaire, bien que très spéculative, est une structure géométrique étrange appelée *trou de ver* : cette espèce de tunnel connecterait le fond du trou noir à une région de l'Univers appelée *fontaine blanche*, car elle fonctionnerait à l'inverse d'un trou noir (selon certains modèles, cette région pourrait même se trouver dans un « autre » univers). Cette solution mathématique des équations de la relativité ouvre des perspectives singulièrement nouvelles pour les voyages spatio-temporels, car elle offrirait des raccourcis d'espace-temps permettant d'éventuels trajets de plusieurs années-lumière en quelques heures, sans toutefois dépasser la vitesse de la lumière. Certaines trajectoires pourraient même remonter le temps !

Auditeur : Mais les parties attirées par le trou sont attirées par quoi ? S'il n'y a pas de densité du trou, qu'est-ce qui attire ?

J.-P. L. : Ce qui attire, ce n'est pas la matière ni la densité, c'est la courbure de l'espace. Je vous rappelle que dans la théorie de la relativité générale, on remplace le concept de force d'attraction gravitationnelle par celle de la courbure de l'espace. C'est pour cette raison que l'on aboutit à des espace-temps étrangement tordus, et certaines de ces distorsions conduisent à la possibilité de voyages dans l'espace et dans le temps.

La relativité ne s'applique pas seulement aux trous noirs, mais également à la description de la structure et de l'évolution de notre univers tout entier, c'est-à-dire à la cosmologie... Les modèles cosmologiques relativistes, qui ont aujourd'hui remplacé les anciens systèmes du monde d'Aristote, Ptolémée, Copernic ou Newton, sont des solutions engendrées par les équations de la relativité générale. En cosmologie, il est raisonnable de présumer que l'espace physique est

équivalent en chacun de ses points. Cette hypothèse, appelée « principe cosmologique », est une extrapolation à l'échelle universelle de l'idée que nous ne sommes pas au centre du monde ; elle se traduit mathématiquement par le fait que l'espace doit posséder une courbure moyenne constante. En effet, puisque la courbure est engendrée par la matière, le fait que cette dernière soit distribuée de façon uniforme entraîne que la courbure à grande échelle soit elle-même uniforme. Pour mieux le visualiser, je reprends la métaphore du tissu élastique. Si je voulais représenter l'Univers dans son ensemble, il faudrait déployer une immense surface, sur laquelle un grand nombre de billes représentant les galaxies et possédant sensiblement la même masse seraient placées de façon régulière. La distribution de ces masses étant uniforme, on imagine facilement que le tissu acquerrait une courbure constante.

Trois cas de figure s'offrent donc aux cosmologistes : cette courbure constante peut être positive, négative ou nulle. Pour mieux me faire comprendre, je rappelle qu'à deux dimensions, la surface d'une sphère a une courbure positive, le plan a une courbure nulle et une selle de cheval a une courbure négative. Sur la sphère, la somme des angles d'un triangle est supérieure à 180 degrés ; dans le plan, elle est exactement égale à 180 degrés ; sur la selle, elle est inférieure à 180 degrés. L'espace cosmique tridimensionnel peut être courbé tout comme les surfaces, mais de façon plus compliquée.

En principe, on pourrait détecter la courbure de l'Univers en mesurant les angles formés par un triangle cosmique gigantesque. Une autre façon de mesurer la courbure de l'espace est indiquée par la relativité générale : selon que la densité moyenne de matière-énergie est supérieure ou inférieure à une certaine valeur critique, la courbure est positive ou négative, et nulle à la frontière exacte (cette valeur critique est égale à 10^{-29} g/cm³).

Toutefois, l'essence même de la relativité générale étant de coupler les propriétés géométriques de l'Univers à son contenu matériel, l'espace cosmique, modelé par la matière, devait naturellement varier au cours du temps, c'est-à-dire se dilater ou se contracter globalement. Autrement dit, le tissu élastique de l'espace, en plus d'être localement incurvé par la distribution des billes, se dilate ou se contracte en chacun de ses points. C'est Lemaître qui, en 1927, a été le premier à le comprendre et à faire le lien avec des observations astronomiques étranges, qui suggéraient que toutes les galaxies s'éloignaient de la Terre à grande vitesse. En réalité, il a compris que c'est l'espace qui est en expansion, et non pas les galaxies qui fuient l'observateur terrestre. C'est sans doute la plus importante révolution scientifique du XX^e siècle, qui a abouti aux fameux modèles de Big Bang, lesquels décrivent l'histoire complète de l'Univers. Car,

dès lors que l'espace n'est pas statique, n'est pas invariable au cours du temps, il a une histoire, une origine et un destin.

En ce qui concerne son destin, deux scénarios sont possibles : soit l'expansion se ralentit fortement, dilate l'espace jusqu'à un volume maximal, puis laisse place à un mouvement inverse de contraction et de réchauffement s'achevant en un ultime embrasement de l'Univers : le Big Crunch (du mot anglais qui signifie « écrasement ») ; soit l'expansion actuelle se poursuit à jamais, diluant et refroidissant sans cesse l'Univers. Cette seconde possibilité se subdivise elle-même en deux, selon que l'expansion ralentit sans jamais s'arrêter, ou au contraire s'accélère. Ces différents scénarios dépendent des proportions respectives et des formes d'énergie qui emplissent le cosmos. Par exemple, si la densité d'énergie sous forme matérielle dépassait la valeur critique donnée plus haut, l'Univers serait fermé. Les observations actuelles indiquent que ce n'est pas le cas. En outre, on sait qu'il y a beaucoup de matière sombre dans l'Univers, y compris sous forme d'une énergie non matérielle (appelée constante cosmologique, qui peut s'interpréter comme l'énergie du vide quantique), de sorte qu'il est pour l'instant impossible de répondre à la question sur le futur à long terme de notre univers².

Pour le passé de l'Univers, le film de l'expansion projeté « à l'envers » conduit inéluctablement à une époque reculée où l'expansion a commencé tandis que l'Univers se trouvait dans un état très concentré et très chaud. Lemaître avait imaginé que la totalité de la matière cosmique, avant le début de l'expansion, devait se trouver sous la forme d'un « atome primitif » comparable aux noyaux atomiques ordinaires mais beaucoup plus grand, et dont l'instabilité fondamentale aurait engendré l'expansion. La vision de Lemaître, revue et corrigée par les progrès ultérieurs de la physique, a donné naissance aux fameux modèles de Big Bang. Au sens mathématique du terme, le Big Bang correspond à une « singularité » où la courbure de l'espace devient infinie. C'est une extrapolation de la relativité générale ; le Big Bang échappe donc aux lois de la physique connue, et une meilleure description de cet état singulier (qui pourrait être obtenue par une théorie de la gravité quantique, par exemple) est l'un des grands enjeux de la recherche du XXI^e siècle. Par exemple la cosmologie quantique, qui est actuellement la forme la plus élaborée de la cosmogonie scientifique, tente de mettre en équations le surgissement spontané de l'Univers à partir des fluctuations du vide quantique. Ce dernier ne ressemble nullement au vide traditionnel ; il est semblable à un océan virtuel sans cesse agité d'ondes d'énergie, lesquelles peuvent engendrer spontanément des paires de particules et d'antiparticules. Ces couples éphémères, s'annihilant aussitôt apparus, laissent la place à une écume bouillonnante d'énergie et

perpétuellement changeante. Au hasard des fluctuations, il peut arriver qu'une particule et son antiparticule soient suffisamment séparées pour ne plus pouvoir s'annihiler mutuellement. De la matière surgit alors du vide, avatar moderne de l'antique quintessence. Notre univers tout entier pourrait être né ainsi d'une énorme fluctuation du vide, démesurément grandie sous l'effet de l'expansion.

Pour comprendre la gravité quantique, les physiciens ne sont pas avares d'analogies et de métaphores. L'une d'elles, proposée dès les années 1960 par John Wheeler, est l'écume d'espace-temps. Si nous observons l'océan à bord d'un avion volant à haute altitude, nous avons l'impression qu'il est lisse et plat, ou tout du moins faiblement courbé ; nous le décrirons donc par un espace mathématiquement simple : un morceau de plan euclidien ou une portion de surface sphérique de courbure uniforme. Si nous nous rapprochons, nous obtenons une meilleure résolution et nous voyons apparaître les vagues ; la surface de l'océan reste connexe, c'est-à-dire d'un seul tenant, et continue, mais elle acquiert une courbure variable de place en place, au gré des creux et des vagues. L'océan est cabossé. Enfin, si nous descendons au ras des vagues, c'est-à-dire si nous scrutons la surface de l'océan avec la résolution maximale, nous ne pouvons la décrire qu'à l'aide d'un espace mathématique extrêmement compliqué et dont la forme varie constamment au cours du temps. C'est une écume bouillonnante qui change ses structures spatiales en permanence, et de façon imprévisible. L'espace n'est même pas connexe, puisque des gouttes se détachent.

Dans les années 1980, une autre hypothèse a supplanté celle de l'écume d'espace-temps : la théorie des cordes, qui stipule que les constituants fondamentaux de la matière ne sont pas des particules ponctuelles, mais des cordes ouvertes ou fermées à l'échelle de la longueur de Planck, dont les modes vibratoires définissent les propriétés des particules. Dans ce cadre, l'espace-temps devient un concept dérivé, qui ne prend sens qu'à une échelle supérieure à celle des cordes. La théorie des cordes, qui se décline selon plusieurs variantes, a suscité un tel engouement que certains physiciens ont pu croire en tirer une « théorie de tout ». Cependant, les difficultés mathématiques sont redoutables et il n'est pas certain qu'elles soient résolues dans un proche avenir.

Ces approches, même balbutiantes, apportent des éclairages tout à fait nouveaux sur la naissance de l'espace et du temps lors du Big Bang : la cosmogonie quantique. Un océan d'énergie bouillonnante est associé au vide quantique. Cette énergie engendre certaines fluctuations beaucoup plus importantes que d'autres sur des temps extrêmement courts (en vertu de l'inégalité de Heisenberg temporelle qui, dans la mécanique quantique, contraint l'extension en énergie à

des valeurs d'autant plus grandes que l'extension temporelle est courte). Dans cet océan quantique, les plus grosses fluctuations d'énergie pourraient éjecter spontanément des gouttes d'écume qui, une fois détachées, évolueraient selon leurs lois propres, sous forme d'univers à part entière. Dans un tel schéma développé notamment par Andrei Linde, notre univers ne serait plus unique ; il ferait partie d'un *multivers*. Notre univers, dont les astrophysiciens tentent laborieusement de reconstituer la structure et l'histoire en effectuant des observations astronomiques et en bâtissant des modèles cosmologiques, ne serait donc qu'une bulle très particulière qui se serait détachée du vide quantique il y a environ 15 milliards d'années – un temps mesuré dans sa propre horloge. Le multivers, lui, affranchi du temps et de l'espace, serait une mousse d'univers chaotique sans cesse régénérée, engendrant des bulles d'univers aux interconnexions perpétuellement changeantes, chaque bulle ayant des propriétés différentes, y compris le nombre de dimensions spatiales.

Je m'éloigne beaucoup de notre sujet, celui de la représentation de l'espace dans l'art... Jusque-là, je vous ai surtout parlé de physique parce que je pense que toutes les idées nouvelles sur la représentation de l'espace n'ont pas encore été « digérées » par les artistes. Elles le seront un jour, nécessairement. Chaque révolution conceptuelle portant sur les représentations scientifiques de l'espace, du temps et de la matière, finit tôt ou tard par être intégrée dans l'imaginaire des artistes, du moins ceux qui sont à l'écoute du monde et qui ensuite retranscrivent, à leur façon, ces nouvelles découvertes. Les artistes ont aussi des intuitions empiriques qui peuvent inspirer les scientifiques. Il y a échange permanent entre ces deux types d'imagination créatrice.

Infiniment courbe et Nuit étoilée

La deuxième partie de mon intervention commencera par un film intitulé *Infiniment courbe*, dont j'ai coécrit le scénario. J'avais longtemps rêvé de pouvoir faire un film traduisant en images les notions abstraites sur l'espace-temps courbe. La chaîne Arte s'est finalement intéressée au projet et a permis la production de ce documentaire de création de cinquante-deux minutes, réalisé en 1992 par Laure Delesalle. Cette approche purement visuelle et assez métaphorique de l'espace-temps vous reposera, je l'espère, du discours sans doute trop abstrait que je vous ai tenu jusqu'ici.

[Projection du film *Infiniment courbe*]

J.-P. L. : Des questions particulières sur le film ?

Auditeur : Je trouve que cela laisse moins de liberté à la pensée que tout le discours que vous nous avez tenu ce matin. C'est plus pédagogique, en fait. Du coup ce matin je me sentais plus libre.

J'aimerais avoir l'avis de l'auditoire...

J.-P. L. : Effectivement, on entraîne le spectateur dans une sorte de discours démonstratif qu'il était difficile d'éviter...

Auditeur : Il y a peut-être là davantage une volonté d'expliquer que d'exposer, comme vous l'avez fait ce matin ? Je ne sais pas... Quelle est l'opinion des autres ?

Auditeur : Est-ce destiné à des enfants aussi ? Vous êtes très didactique dans ce film.

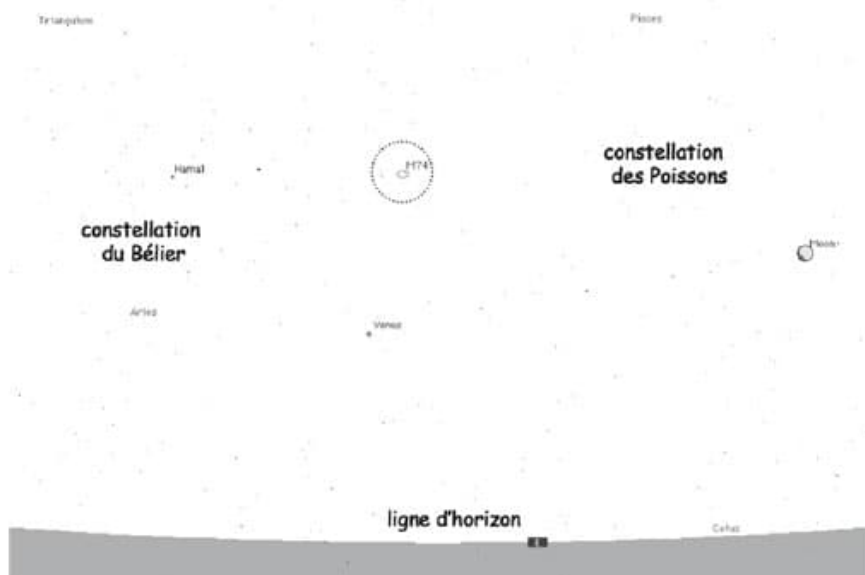
J.-P. L. : Le film est destiné à tous les publics. Il comporte effectivement des parties simples, pour ne pas dire simplistes. Nous avons beaucoup hésité à utiliser en voix off cette forme de questions-réponses. Nous avons essayé d'autres formes de narration mais elles ne fonctionnaient pas, alors nous en sommes restés à celle-là. En outre, le documentaire devait entrer dans le cadre des émissions pédagogiques d'Arte, avec toutes les contraintes imposées par les producteurs et par la chaîne. Il ne faut pas oublier que dans l'audiovisuel, l'auteur est souvent moins libre que dans d'autres formes d'expression artistique.

Auditeur : C'est quand même visible par des enfants ?

J.-P. L. : Oui, je l'espère ! Même si à un certain moment, on voit une femme nue et de doctes savants qui tournent autour !

Avant de poursuivre mon discours sur les représentations purement géométriques de l'espace, je vais faire une brève digression sur une toile de Van Gogh, intitulée *La Nuit étoilée*, qui va vous faire entrer enfin dans un champ visuel plutôt qu'abstrait (voir [cahier 2, figure 5](#)). On sait que Van Gogh, l'homme du Nord aux cieux chargés, était fasciné par la limpidité du firmament provençal. Il sortait la nuit, en pleine campagne, avec ses toiles et ses pinceaux, des bougies plantées sur le rebord de son chapeau de paille pour s'éclairer, et il peignait le ciel. En 1888, il a peint une nuit étoilée au-dessus du Rhône où l'on reconnaît les sept étoiles du Chariot, dans la constellation de la Grande Ourse – preuve du réalisme dont Van Gogh faisait preuve dans la transposition picturale du firmament. Ce réalisme est moins évident dans d'autres toiles de l'époque, et les exégètes se sont demandé si les représentations van goghiennes du ciel n'avaient pas peu à peu glissé du réalisme à l'imagination la plus folle, voire au délire, au rythme de sa propre détérioration psychique, suite à l'épisode de l'oreille coupée daté du 23 décembre 1888. La plus fascinante de ses toiles est la *Nuit étoilée au-dessus de Saint-Rémy*, peinte à l'asile de Saint-Paul de Mausole. Un ciel immense chargé d'objets lumineux, une lune et des étoiles trop grosses parmi de vastes spirales tourbillonnantes semblent mettre en cause le réalisme de Van Gogh. Dans une lettre à son frère Théo, datée du 19 juin 1889, Vincent écrit : « J'ai enfin terminé la *Nuit Étoilée* ». En ces mois d'activité fébrile, Van Gogh a donc posé les premiers éléments

picturaux de sa toile quelques jours, voire quelques semaines auparavant. Aujourd'hui, des logiciels astronomiques sur micro-ordinateur permettent de reconstituer les cartes du ciel au-dessus d'un lieu quelconque et à n'importe quelle époque. Calculons ainsi³ les cartes du ciel au-dessus de Saint-Rémy-de-Provence pour chaque nuit précédant la date du 19 juin 1889. Surprise : très précisément le 25 mai 1889 à 4 h 40 heure locale, le ciel en direction de l'est a fugitivement présenté une configuration remarquablement proche de celle peinte par Van Gogh : l'aube naissante, se traduisant par un voile blanchâtre au-dessus des collines, la brillante planète Vénus précédant le Soleil encore sous l'horizon, le croissant de Lune éclairé à l'est, les deux étoiles principales de la constellation du Bélier de part et d'autre du cyprès, et deux étoiles de la constellation des Poissons entre la Lune et le Bélier. L'élément le plus remarquable du tableau est la grande spirale centrale.



Reconstitution astronomique du ciel vu par Van Gogh le 25 mai 1889 à 4 h 40.

À cette position, le logiciel astronomique indique l'existence d'une galaxie spirale dans la constellation des Poissons (voir [cahier 2, figure 6](#)), invisible à l'œil nu mais qui peut être photographiée avec un télescope de moyenne puissance et un temps de pose suffisamment long. L'image de cette galaxie est celle d'une spirale vue de face, extrêmement ressemblante avec la spirale de Van Gogh. N'en concluons pas que le peintre était doué d'une vue télescopique surnaturelle ! Comme l'indique sa correspondance, il était tout simplement passionné par les choses célestes. Lecteur assidu de la

revue *L'Astronomie* éditée par Camille Flammarion, il y avait découvert avec émerveillement les premières photographies de nébuleuses spirales. On sait aussi qu'il avait lu *L'Astronomie populaire*.

Le « réalisme de position » des nuits étoilées de Van Gogh ne fait donc aucun doute, et donne au spectateur une émotion supplémentaire : celle de connaître la minute précise à laquelle le peintre a reporté pour la première fois sur sa toile les points lumineux du ciel provençal. Je signale aussi qu'une œuvre musicale absolument magnifique d'Henri Dutilleux porte également ce titre, car cette composition pour orchestre s'inspire du tableau de Van Gogh.

L'espace pavé

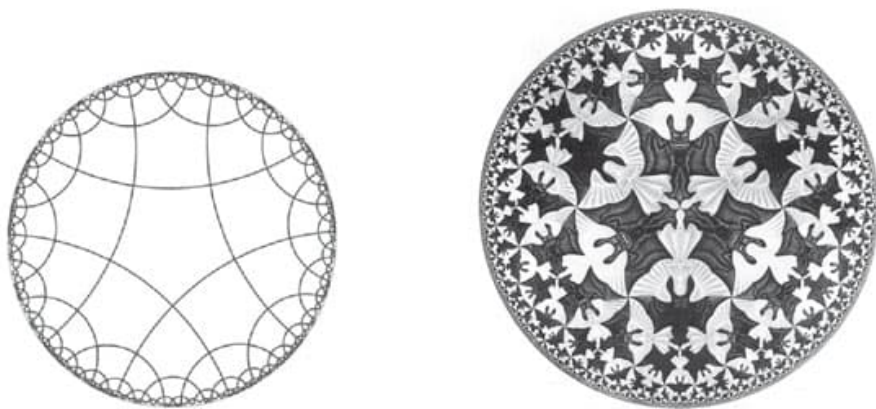
Je reviens maintenant à notre espace euclidien pour aborder la question des pavages. Beaucoup d'artistes, notamment les mosaïstes, ont été confrontés au problème de trouver des motifs plus ou moins réguliers dont la répétition à l'identique forme un pavage. Cette problématique se rencontre en particulier dans l'art islamique, puisque le Coran interdit la représentation picturale des êtres animés. Cette contrainte a engendré une forme d'art abstrait, puisque les motifs utilisés dans l'art islamique du pavage sont fondés sur des abstractions géométriques. À l'Alhambra de Grenade, par exemple (voir [cahier 2](#), [figure 7](#)), on voit de magnifiques mosaïques conçues dans cet esprit.

Alors que les mosaïstes avaient découvert toutes les façons rationnelles de répéter des motifs réguliers de manière à paver un plan, ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que le problème mathématique a été résolu. Le mathématicien et cristallographe russe Fedorov a étudié les groupes de symétrie des cristaux naturels et s'est intéressé à ces structures pour définir tous les pavages possibles de l'espace euclidien. Il a découvert qu'il existe dix-sept groupes de symétrie permettant un pavage régulier du plan. La méthode consiste à trouver un motif de base, une sorte de « cellule fondamentale » qui va être répétée par un ensemble de déplacements particuliers, en l'occurrence des translations, des rotations ou des réflexions. On entre là dans le cadre de la théorie des groupes, qui permet la classification de tous les groupes de symétrie. Ainsi, les mosaïstes avaient trouvé de façon empirique et intuitive des symétries mathématiques remarquables.

Escher est l'exemple le plus frappant des rapports entre mathématiques et arts graphiques. En 1936, le jeune artiste s'est rendu à l'Alhambra de Grenade, où il a été fasciné par les pavages mauresques. Peu après cette visite, il a lu un article de vulgarisation que le mathématicien hongrois George Pólya avait publié en 1924 sur les groupes de symétrie dans le plan. Sans en comprendre l'aspect abstrait, Escher a su en extraire les dix-sept groupes de symétrie qui y

étaient décrits. Entre 1936 et 1941, il a appliqué ses nouvelles connaissances dans une série impressionnante d'estampes présentant tous les pavages périodiques possibles. Prenant le contre-pied de l'art islamique, qui devait se cantonner à des motifs purement géométriques, Escher a utilisé des formes animales ou humaines : des papillons, des oiseaux, des poissons, des lézards, des diabolins. Il est entré en contact avec des mathématiciens de renom comme Donald Coxeter et Roger Penrose, et a travaillé en collaboration avec eux. En introduisant dans ses estampes des motifs de couleur – dimension supplémentaire qui n'est pas prise en compte dans la classification de Fedorov –, Escher a ouvert un nouveau pan de la géométrie (voir [cahier 2](#), [figure 8](#)), la théorie des groupes de symétries polychromatiques, ultérieurement étudiée par Coxeter.

On ne peut pas réaliser un carrelage avec des pentagones. Mais les pavages semi-réguliers, composés à l'aide de motifs différents, sont aussi un domaine d'étude fascinant, qui a été formalisé par les travaux mathématiques de Roger Penrose. Penrose est un remarquable mathématicien et physicien polyvalent, à l'imagination extrêmement créative. Non seulement il a travaillé sur les pavages, mais il est l'un des plus éminents spécialistes de la relativité générale, l'un des fondateurs de la théorie des trous noirs, et il s'intéresse depuis peu à la modélisation du fonctionnement de la pensée à l'aide de la physique quantique ! La dernière fois que je l'ai rencontré lors d'un dîner chez un ami commun, il m'a montré des diapositives de certains pavages qu'il a brevetés et qui sont aujourd'hui utilisés par des entreprises de carrelage. Il gagne donc de l'argent avec ses découvertes mathématiques, ce qui est plutôt rare !



Représentation de Poincaré du plan hyperbolique (à gauche) et *Limite circulaire IV* par M. C. Escher.

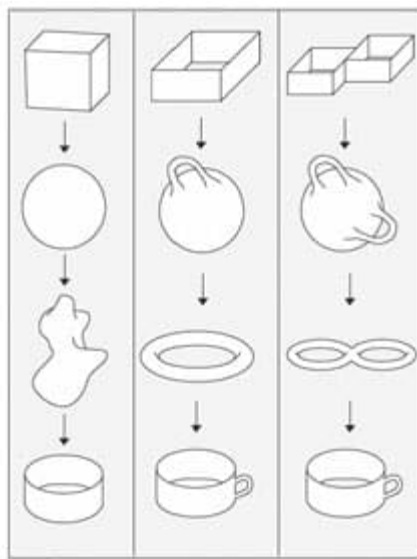
Là encore, les pavages semi-réguliers ont d'abord été explorés

empiriquement par les artistes et artisans. L'origami, art traditionnel du papier plié si prisé au Japon, est très précisément lié aux pavages semi-réguliers du plan ; comme quiconque a pu le vérifier en fabriquant une cocotte en papier, les tesselles sont des polygones tels que triangles, rectangles, etc., qui ne sont pas tous identiques.

Escher ne s'est pas cantonné aux pavages de l'espace euclidien, il a également réalisé des estampes qui représentent des pavages d'un plan hyperbolique, c'est-à-dire une surface de courbure négative. Pour les besoins de la représentation sur une feuille de papier, il faut faire une transformation de coordonnées qui déforme la représentation : alors même que l'espace hyperbolique est infini, l'infini est ramené à distance finie, c'est-à-dire que la totalité de l'espace hyperbolique est inscrite entièrement à l'intérieur d'un cercle. Cette représentation, découverte au début du XX^e siècle par Henri Poincaré, porte son nom. Escher a réalisé une série d'estampes intitulée *Limite circulaire*, dans lesquelles il a utilisé cette représentation de Poincaré. On voit par exemple des poissons se répéter de façon à couvrir régulièrement la totalité de la surface, mais qui deviennent apparemment de plus en plus petits quand on s'approche du bord du disque.

La topologie

Je vais maintenant aborder la branche de la géométrie appelée la topologie, qui s'intéresse aux propriétés globales des espaces. Examinez ces surfaces qui semblent différentes – la surface d'un cube, d'une sphère, une sorte de patate et un bol... En fait, ces surfaces peuvent se déduire l'une de l'autre par déformation continue. On dit de ces surfaces qu'elles ont la même topologie. *Idem* pour ces surfaces qui ont un trou : une sphère avec une anse peut être déformée pour donner la surface d'un anneau, que l'on appelle un tore. Si je continue à déformer le tore, j'obtiens une tasse à café avec une anse.



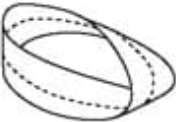
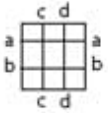
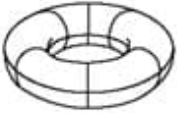
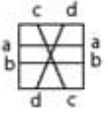
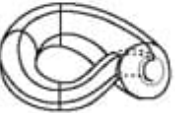
Types de surfaces.

Les mathématiciens ont découvert qu'il est possible de représenter n'importe quelle surface par un polygone dont on recolle deux à deux certains côtés. Ainsi, en collant deux bords opposés d'un carré, on obtient un morceau de cylindre, et si l'on réunit les deux extrémités de celui-ci on fabrique un tore.

Imaginons une créature évoluant sur un tore, voyageant tout droit le long d'une direction principale ; elle communique par des rayons lumineux avec son point de départ, de sorte qu'elle peut calculer la distance parcourue ; à un certain moment, cette distance atteint un maximum puis se met à diminuer ; après avoir fait un tour complet, la créature est revenue à son point de départ. Elle en conclura qu'elle vit dans un espace d'extension finie. Pourtant, en ayant mesuré autour d'elle la somme des angles d'un triangle, elle a toujours trouvé 180 degrés, si bien qu'elle déduira aussi qu'elle vit dans un plan euclidien. La métrique (géométrie locale) du tore plat reste donnée par le théorème de Pythagore, tout comme celle du plan et du cylindre. Sa topologie, sa forme globale, est différente.

Il y a un rapport avec les pavages mosaïques dont je vous ai parlé plus haut. À partir du polygone fondamental et en répétant les opérations de collage, on crée indéfiniment des répliques du motif de base ; ce faisant on réalise un pavage d'un espace plus grand, appelé « espace de revêtement universel ». Le revêtement universel du tore est le plan euclidien infini – ce qui traduit bien le fait que le tore plat est une surface euclidienne. Si on le découpe le long de son petit cercle et le long de son grand cercle, puis qu'on le déplie, il se transforme en un morceau de plan euclidien : un rectangle.

Il y a trois catégories de surfaces : celles de courbure positive, celles de courbure nulle et celles de courbure négative. Le prototype des surfaces de courbure positive est la sphère, le prototype des espaces euclidiens est le plan, le prototype des espaces hyperboliques ressemble à une selle de cheval.

Nom	Polygone fondamental et identifications	Forme	Fermé	Orientable
cylindre			NON	OUI
bande de Möbius			NON	NON
tore			OUI	OUI
bouteille de Klein			OUI	NON

Classification des surfaces euclidiennes.

Je vous montre la classification des surfaces euclidiennes, c'est-à-dire de courbure nulle : il en existe en tout et pour tout cinq. La première, c'est le plan usuel. Les quatre autres sont le cylindre, le ruban de Möbius, le tore, et la bouteille de Klein. Toutes ces surfaces peuvent être obtenues en partant d'une cellule fondamentale qui est un rectangle, et en faisant des collages particuliers sur tel ou tel côté.

Pratiquement tous les écoliers ont construit au moins une fois dans leur vie le fameux ruban de Möbius. À partir d'un rectangle de papier on colle deux faces opposées, mais en faisant un demi-tour avant de coller. Pour pouvoir le faire, il faut un rectangle de papier suffisamment long, tordre le papier sans le déchirer, et on obtient ce fameux ruban qui a fasciné les mathématiciens et les artistes, notamment les sculpteurs. En effet, il a une propriété étrange : c'est une surface qui n'a qu'une seule face, comme on peut s'en apercevoir

si on suit le trajet d'une fourmi qui marche toujours droit devant elle.

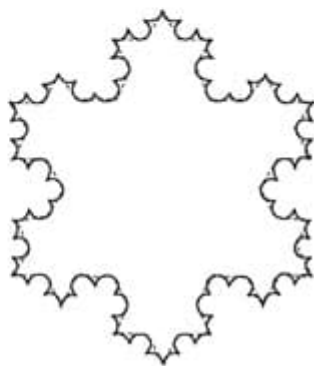
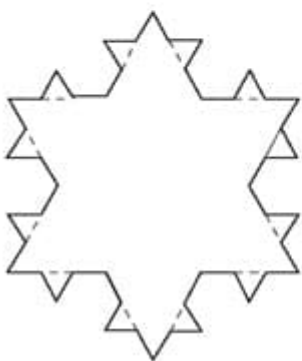
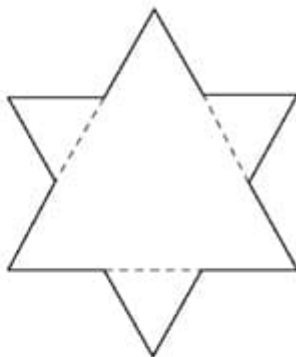
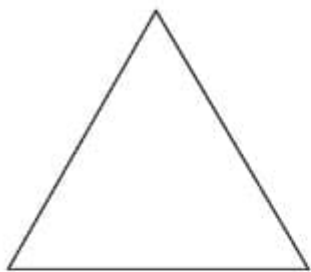
La bouteille de Klein est une sorte de mélange entre le tore et le ruban de Möbius. On commence par faire un cylindre, ensuite on colle les deux autres côtés après avoir tourné de 180° . La bouteille de Klein ne peut être représentée sur une feuille de papier. C'est une abstraction pure, une surface qui, bien que complètement fermée sur elle-même, n'a pas d'intérieur ni d'extérieur. C'est malgré tout une surface euclidienne, et fait donc partie des espaces les plus simples. On voit que même au sein des espaces les plus simples on trouve des formes extrêmement subtiles qui sont permises par la topologie : cette branche de la géométrie qui classifie et essaie de comprendre les formes des espaces.

Auditeur : La géométrie fractale ne s'occupe-t-elle pas, justement, des formes qui ne peuvent pas être réduites à la géométrie normale, comme la tête de l'arbre ou les formes de la nature ?

J.-P. L. : La géométrie fractale s'intéresse effectivement aux formes, mais pas du tout dans la même optique. Elle ne s'intéresse pas aux formes globales des espaces, mais à des motifs qui peuvent se retrouver à des échelles de résolutions différentes, un peu comme des poupées gigognes qui s'emboîtent les unes dans les autres. Lorsque des formes géométriques s'emboîtent les unes dans les autres de façon régulière, l'objet mathématique correspondant s'appelle une fractale. Nombre de formes naturelles peuvent être décrites mathématiquement, de façon assez fidèle par des fractales, lesquelles suscitent beaucoup d'intérêt auprès des plasticiens. Les formes fractales produites par des ordinateurs dégagent très souvent une charge émotionnelle d'autant plus étonnante qu'elles proviennent de systèmes d'équations assez simples : on fait tourner le programme d'ordinateur et on engendre des formes qui sont souvent d'une beauté stupéfiante...

Un des premiers exemples de fractale a été donné par le mathématicien von Koch. Ce qui est extraordinaire, c'est la simplicité du procédé de base et la complexité du résultat lorsqu'on itère le procédé un grand nombre de fois. La courbe de von Koch est obtenue en partant d'un segment que l'on partage en trois. Sur le tiers central du segment, on construit un triangle équilatéral. On répète le processus sur chacun des segments. Chacun d'eux engendre donc une structure qui est le reflet à plus petite échelle de la structure. C'est le niveau 2 de l'opération. On recommence au niveau 3, et ainsi de suite, théoriquement jusqu'à l'infini, avec des segments de plus en plus petits à mesure qu'on avance. Seuls les ordinateurs peuvent arriver à des configurations vraiment éloignées de la configuration de départ. L'objet mathématique final est un type d'espace complètement différent de ceux dont je vous ai parlé jusqu'ici. C'est un espace qui a

une dimension qui n'est même plus un nombre entier. Le résultat est un espace fractal intermédiaire entre une ligne de dimension 1 et une surface de dimension 2.



Construction de la courbe de von Koch.

Auditeur : C'est pour cela que ce n'est pas réductible à la topologie ?

J.-P. L. : Absolument. Avec la topologie, je ne vous parlais que d'une classification des espaces qui ont une dimension entière. L'un des intérêts des fractales, c'est qu'on peut en produire de n'importe quel type à partir de pratiquement n'importe quel motif et d'un algorithme astucieux. Beaucoup de phénomènes naturels sont assez fidèlement décrits par des fractales, comme le découpage des feuilles d'un arbre ou celui de la côte de Bretagne. Si on suit la côte de Bretagne sur une carte de géographie et que l'on mesure, par exemple, la distance de Saint-Malo à Quimper, on trouve mettons 500 kilomètres. Ensuite, on se rend sur le terrain et on mesure le nombre de pas en suivant la côte. Cette fois, on suit toutes les anfractuosités du terrain, et pour la distance Saint-Malo-Quimper, on trouve 2 000 kilomètres. Ensuite, on demande à une fourmi de faire la

mesure. La fourmi, chargée de parcourir les minuscules anfractuosités de la côte de Bretagne, ne pourra jamais y parvenir de son vivant, bien sûr. Si elle y arrivait, elle trouverait que la côte de Bretagne mesure 1 million de kilomètres. Et pour aller encore plus loin, on remplace la fourmi par une molécule, on obtient alors une longueur de la côte de Bretagne qui tend vers l'infini. En fait, la côte de Bretagne se rapproche d'une fractale, c'est-à-dire que sa longueur dépend du niveau de résolution auquel on l'observe. Les fractales présentent un intérêt pour la représentation des formes de la nature, et jouent donc un rôle très important aujourd'hui en imagerie de synthèse, animation de jeux vidéo, etc. Notamment pour la représentation des paysages naturels en réalité virtuelle. Il existe des « recettes fractales » qui permettent de représenter de façon extraordinairement réaliste les montagnes ou les nuages.

Auditeur : C'est incroyable qu'Escher ait eu déjà une idée de cela.

J.-P. L. : En réalité, il a eu plus d'intuition du côté de la topologie que de celui des fractales. D'ailleurs, j'ai omis de vous dire qu'il a tenté un truc absolument impossible : représenter la bouteille de Klein. Sa gravure s'intitule *La Galerie d'estampes*. Elle représente un personnage qui contemple un tableau dans une galerie, mais en fait le tableau de la galerie se transforme en son propre tableau, c'est-à-dire que la galerie est à la fois la galerie et l'un des tableaux de la galerie. Escher n'a sans doute pas réalisé que cette construction se rapprochait de celle d'une bouteille de Klein, comme les mathématiciens s'en sont aperçus ultérieurement !



La Galerie d'estampes par M. C. Escher.

L'espace chiffonné

Pour terminer, intéressons-nous à l'espace à trois dimensions et aux diverses formes qu'il peut avoir, avec l'idée que l'espace réel pourrait bien ressembler à cela. De même qu'à deux dimensions, à partir d'une feuille de papier dont on collait les bords, on pouvait engendrer un espace fini, refermé sur lui-même, pour obtenir le tore, on peut le faire à trois dimensions en partant non plus d'une feuille de papier, mais d'un parallélépipède. Vous prenez donc un volume parallélépipédique découpé dans l'espace euclidien ordinaire, et vous considérez que les paires de faces opposées du parallélépipède sont en fait les mêmes. Le résultat final, qu'on ne peut pas visualiser, est un espace toujours euclidien, sans courbure, mais qui est complètement refermé sur lui-même. On l'appelle « hypertore ». Il existe six hypertores différents, tous des espaces euclidiens à trois dimensions qui ont un « trou ». Il est impossible de visualiser ce trou, parce qu'il faudrait un système mental à quatre ou cinq dimensions. Il n'y a que les mathématiques ou des schémas simplifiés qui permettent de

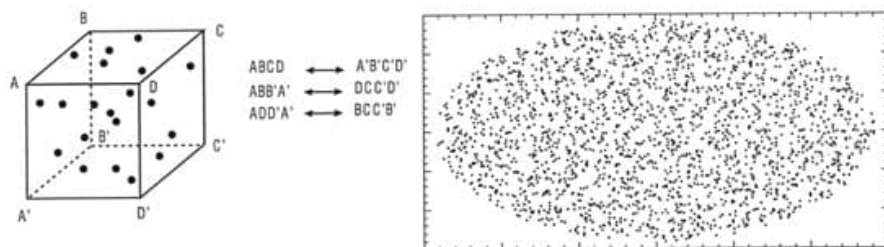
représenter ces espaces.

La classification topologique des espaces euclidiens nous apprend qu'en réalité, en trois dimensions, il en existe 18 – dont l'espace habituel, infini, et les 6 hypertores dont je viens de vous parler. Vous me direz : « Pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple ? » Eh bien, parce que rien n'interdit que notre univers réel soit de cette nature : au lieu d'être un espace euclidien s'étendant à l'infini, il ne serait euclidien qu'à notre échelle, c'est-à-dire localement, mais à très grande distance il se refermerait sur lui-même à la façon d'un hypertore. Quelle serait la conséquence pour nous qui sommes plongés dans cet espace ? Une fantastique illusion d'optique. Je vous en explique la raison : prenons un rayon lumineux qui va d'une source de lumière (étoile, galaxie) à un observateur (astronome). Si l'espace a une topologie compliquée, il y a une infinité de trajets possibles pour aller de la source à l'observateur. Prenons l'exemple du cylindre. Il y a non seulement le trajet direct, mais aussi le trajet qui fait un tour du cylindre et qui parvient à l'observateur dans une autre direction. Celui-ci va donc voir une autre image de la source de lumière. En réalité, il verra un grand nombre d'images « fantômes » de la même galaxie, qui correspondent aux rayons lumineux qui ont fait un, deux, trois, quatre tours, etc.

Si nous vivions dans un tel espace à la topologie un peu compliquée, que j'appelle un *espace chiffonné*, nous serions plongés dans un vaste mirage cosmique à cause de la démultiplication des trajectoires des rayons lumineux, une sorte de gigantesque jeu de miroirs qui nous donnerait l'illusion de vivre dans l'espace de revêtement universel évoqué plus haut à propos des pavages d'espace. Reprenons l'exemple le plus simple, celui de l'hypertore. L'espace réel serait assimilable à l'intérieur d'un parallélépipède abstrait dont les faces sont recollées. Il pourrait être relativement petit, disons 5 milliards d'années-lumière au lieu de 15, mais donner l'illusion d'un espace beaucoup plus grand, voire infini. Toutes les images fantômes d'une galaxie donnée seraient vues dans toutes les directions et à des distances apparemment différentes. L'univers apparent ressemblerait à une sorte de cristal développé dans l'espace et le temps à partir de la cellule fondamentale, qui serait l'espace réel, plus petit que l'espace perçu. On retrouve ainsi certaines préoccupations des mosaïstes dans cette nouvelle branche de la cosmologie que l'on appelle « topologie cosmique ». En effet, la classification mathématique des espaces tridimensionnels, qu'ils soient euclidiens, sphériques ou hyperboliques, peut être incorporée dans les modèles de Big Bang.

Pour se convaincre de la pertinence de l'idée, nous avons fait des simulations d'ordinateur, afin de calculer le mirage topologique créé par un univers chiffonné, et de comparer le résultat avec l'univers

observé par les télescopes. Le résultat est étonnant. On crée facilement l'illusion d'une répartition des galaxies homogène à grande échelle, mais avec des détails à petite échelle tels que creux, vides, filaments, ressemblant aux cartes du ciel profond qui sont réellement observées.



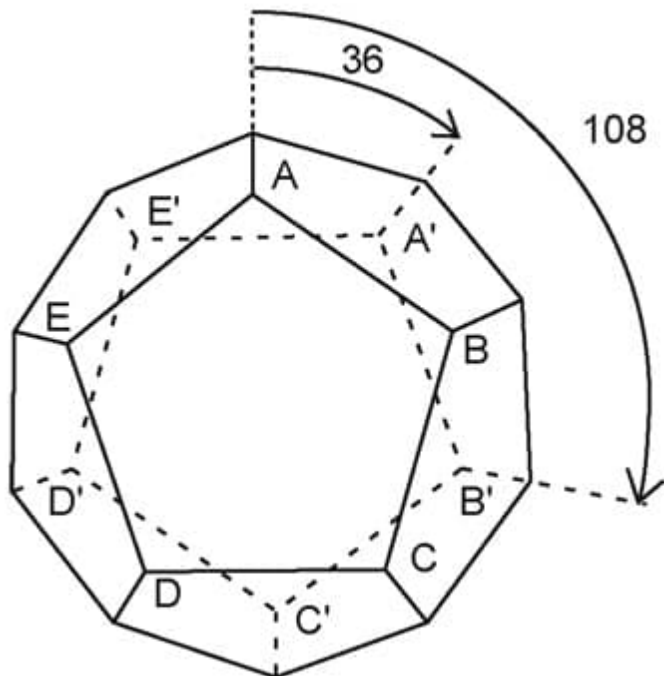
Dans cette simulation numérique on a placé au hasard une vingtaine de galaxies dans un modèle d'univers hypertorique dont la taille est de 1 milliard d'années-lumière seulement (à gauche). L'aspect du ciel ne se réduit pas aux images des vingt galaxies, car les rayons lumineux empruntent de multiples trajets pour nous parvenir. Au contraire, l'image de chacune des « vraies » galaxies est démultipliée en un grand nombre d'images « fantômes » qui donnent à l'univers l'apparence d'être beaucoup plus vaste et peuplé (à droite).

Auditeur : C'est possible de faire le contraire ? C'est-à-dire de distinguer les objets réels de tous les autres ?

J.-P. L. : Individuellement, non, mais statistiquement, oui ! C'est justement l'objet actuel de mon travail de recherche. Nous partons des cartographies célestes obtenues par les grands télescopes, et nous appliquons des techniques d'analyse statistique sur la répartition apparente de tous les objets pour voir s'il n'y a pas des répétitions de certains motifs, qui révéleraient la forme d'une cellule fondamentale.

Auditeur : Ce serait déduire ce système du réel.

J.-P. L. : Absolument. Initialement, mon idée était purement théorique, en fait ludique car cela m'amusait de jouer avec les formes possibles de l'espace. Ensuite j'ai compris que l'on pouvait faire la démarche inverse et, à partir des observations astronomiques décodées à la lumière d'un espace chiffonné, remonter à une possible architecture secrète de l'Univers.



Espaces dodécaédriques de Poincaré (où les faces opposées sont collées après rotation de 36 degrés) et de Seifert-Weber (rotation de 108 degrés).

L'un des espaces chiffonnés les plus intéressants, celui de Poincaré, est représentable par un polyèdre fondamental qui est un dodécaèdre, c'est-à-dire l'un des cinq solides platoniciens. L'intérieur du dodécaèdre est chiffonné, puisqu'il est obtenu en identifiant les paires de face opposées en ayant tourné d'un dixième de tour. Le résultat est un espace sphérique très petit. Il se pourrait que la véritable architecture secrète de l'espace soit de cette nature, fondée sur l'un des solides platoniciens sur lequel on applique des principes de symétrie et de répétition. Ce qui serait tout de même une surprise extraordinaire⁴ ! Il y a bien sûr d'autres modèles possibles pour décrire la forme de l'espace, mais c'est une piste intéressante. Et comme il n'y a pas que les arts plastiques et la musique qui entretiennent des relations étroites avec les découvertes scientifiques, mais il y a aussi la littérature, je citerai une phrase étonnante extraite d'un roman de Nina Berberova, *Le Mal noir*. L'écrivain ignorait tout de la cosmologie et des espaces chiffonnés, puisque ceux-ci n'ont été inventés que l'an dernier. Mais dans son roman, elle a écrit cette phrase prémonitoire : « Non ! Je ne peux pas croire que les astres soient si loin, des milliards d'années-lumière, cela ne veut rien dire. Un de ces jours on découvrira qu'ils sont beaucoup plus proches, et tout ce qui nous paraissait infini et immense deviendra petit. »

Navigation et cartes célestes

Auditeur : Je crois que les gens les plus intéressés par l'astronomie pour des raisons de nécessité, ce sont les navigateurs.

J.-P. L. : Oui, dans l'histoire ancienne où l'on naviguait en se repérant avec les étoiles, mais plus maintenant.

Auditeur : Je pense que du point de vue de la mer, cela peut être complètement différent de celui de la Terre. Je me demande si les découvertes des navigateurs correspondaient à celles des astronomes.

J.-P. L. : Pourquoi les points de vue des navigateurs seraient-ils très différents ? Pourquoi la vision du ciel depuis la mer serait-elle différente de celle qu'on a depuis la terre ferme ? Hormis le fait qu'en mer on a un horizon qui est le plus bas possible.

Auditeur : Le Soleil ne se couche pas tout le temps au même point.

J.-P. L. : Cela ne dépend pas du fait qu'on soit sur terre ou sur mer, c'est simplement un effet de position à la surface du globe, et de l'époque de l'année où l'on observe.

Auditeur : Je crois que c'est un peu différent. On voit les choses autrement quand on les voit d'un point mobile, par exemple d'un bateau.

J.-P. L. : Rationnellement, il n'y a pas de différence, mais subjectivement, il peut y en avoir une énorme. Cela fait plutôt appel à ce que j'appelle le « sentiment cosmique ». Regarder la voûte céleste procure un sentiment cosmique tout à fait différent selon que l'on est en pleine mer ou sur terre. Et même sur terre, la perception subjective du ciel est différente selon que vous êtes en plaine ou au sommet d'une montagne. Mais sur le plan purement rationnel et objectif, je vous assure qu'il n'y a aucune différence.

Auditeur : Pour les navigateurs à l'époque des découvertes, c'était une nécessité de se déplacer...

J.-P. L. : Oui. Ce n'est pas un hasard si la révolution astronomique copernicienne date du début du XVI^e siècle, qui est justement l'époque des premières grandes explorations de la planète par les navigateurs. Dans le domaine des cartes célestes par exemple, il y avait des cartes des constellations faites par les Grecs, les Arabes, etc. Mais ils n'avaient pas accès aux constellations de l'hémisphère Sud, qui ne sont jamais visibles sous nos latitudes. Lorsque Magellan est revenu de son premier voyage dans l'hémisphère Sud et qu'il a décrit notamment ces deux nuages qui sont très proches du pôle sud céleste et qu'on appelle aujourd'hui les nuages de Magellan, tout le monde a été surpris puisque jamais personne n'en avait entendu parler. Aujourd'hui d'ailleurs, on sait que ces deux nuages de Magellan sont des galaxies que l'on voit directement à l'œil nu depuis l'hémisphère Sud. Les

grandes explorations maritimes ont surtout fait progresser la cartographie plus que l'astronomie, c'est-à-dire les techniques de représentation sur une feuille plane de la surface sphérique de la Terre, ou de la voûte céleste concave. Cela posait des problèmes de pure géométrie. Les Grecs savaient que la Terre était sphérique, mais au Moyen Âge, les grandes découvertes des Grecs furent oubliées, et l'on était repassé à l'idée d'une Terre plate. L'une des motivations de Christophe Colomb, hormis l'idée de faire fortune avec l'or des Indes, était de redémontrer que la Terre était bien ronde. Et bien entendu, les expéditions maritimes ont bouleversé les représentations géographiques du globe terrestre.

Auditeur : Y a-t-il des cartes du ciel réalisées par les navigateurs ?

J.-P. L. : Non, mais des catalogues d'étoiles, oui ! Les livres de bord tenaient des registres qui alignaient des colonnes de chiffres astronomiques, parce que les navigateurs embarquaient des instruments de visée astronomique, des quarts de cercle et des sextants, qui permettent de mesurer l'angle de visée des étoiles au-dessus de l'horizon. Ce n'est qu'à leur retour en Europe que les navigateurs livraient ces chiffres à des astronomes capables de les matérialiser en cartes du ciel. La première carte du ciel, c'est Dürer qui l'a faite, en 1515, à peu près à la même époque que les voyages de Magellan.

Les symétries de l'Univers

Auditeur : Pouvez-vous nous parler un peu plus des espaces symétriques et de la différence avec les espaces asymétriques ?

J.-P. L. : Qu'est-ce que vous appelez les espaces asymétriques ?

Auditeur : La majeure partie des objets qui nous entourent a des formes asymétriques...

J.-P. L. : D'accord, mais il est intéressant de chercher, à l'intérieur de cette asymétrie, une symétrie cachée.

Auditeur : Pour pouvoir la mathématiser.

J.-P. L. : Exactement. Cela semble une démarche relativement naïve, mais ce qui est étonnant, c'est qu'elle a toujours très bien fonctionné dans l'histoire des sciences. On part du principe qu'il existe des symétries dans la nature, certaines apparentes, d'autres cachées. Le raisonnement dépend aussi du degré d'approximation à partir duquel on considère qu'il y a symétrie. Les symétries mathématiques sont exactes, les symétries naturelles ne le sont pas. Le corps humain est symétrique en première approximation, mais il ne l'est pas tout à fait. Il en va de même dans la nature. Certains aspects de la nature présentent de grandes symétries en première approximation, mais ces symétries simples s'évanouissent et sont remplacées par d'autres

symétries plus subtiles lorsqu'on observe avec plus de précision. Et on remarque alors dans ces symétries plus subtiles d'autres petits écarts, et encore de nouvelles symétries plus complexes, et ainsi de suite. C'est une démarche générale de la physique que de toujours chercher les symétries cachées dans l'Univers. En particulier pour retracer la naissance même de l'espace, du temps et de la matière, il y a 15 milliards d'années au moment du Big Bang. L'une des idées des physiciens théoriciens, c'est que l'Univers à son début ait été complètement symétrique, et qu'au cours de son évolution il le serait devenu de moins en moins. Quand les physiciens recensent l'ensemble des interactions physiques connues, ils en trouvent quatre. On les appelle les interactions fondamentales, parce que la totalité des phénomènes physiques connus s'expliquent sur la base de ces quatre interactions. L'une de ces interactions est la gravitation. L'autre est l'interaction électromagnétique, responsable en particulier des phénomènes de rayonnement électromagnétique, des réactions chimiques, etc. Les deux autres interactions sont de type nucléaire, car elles n'agissent qu'au niveau des noyaux atomiques, à une échelle extrêmement microscopique. L'une est dite forte, parce qu'elle est très puissante et permet la cohésion même des noyaux des atomes. L'autre est dite faible, et elle rend compte des phénomènes de désintégration radioactive. Pourquoi quatre interactions ? Les physiciens se posent la question. Ils aiment toujours simplifier, avoir des théories autant que possible globales, réduire le nombre de paramètres différents. Les physiciens cherchent donc une sorte de superthéorie dans laquelle les quatre interactions fondamentales ne seraient que les reflets à basse énergie d'une interaction unique, qui elle aurait prévalu au moment du Big Bang. Toujours le besoin de trouver le secret du monde, sans la moindre garantie de tenir la bonne piste... On se leurre peut-être complètement, mais comme jusqu'à présent cela semble marcher, eh bien on continue à raisonner dans ce schéma !

Auditeur : C'est la théorie de qui ?

J.-P. L. : De personne en particulier, des dizaines de chercheurs y ont contribué et y travaillent encore. Je vais vous préciser où en sont les recherches actuelles sur les symétries de l'Univers, en remontant pas à pas dans le passé de l'Univers et en tendant vers le Big Bang, toujours plus chaud, plus dense, plus énergétique.

Aujourd'hui l'Univers est âgé de 15 milliards d'années environ, et en moyenne il est froid. Sa température moyenne, que l'on appelle le fond cosmique, est de -270°C . Quand on remonte dans le passé, l'Univers devient en moyenne de plus en plus chaud. Vous savez que lorsqu'on observe une étoile ou une galaxie, on la voit toujours dans le passé, puisque les rayons lumineux qu'elle a émis ont mis un certain temps à parvenir jusqu'à nous, à la vitesse de $300\,000\text{ km/s}$. Ceci est

longuement développé dans le film *Infinitement courbe* que vous avez vu. Eh bien la plus ancienne et plus lointaine image de l'Univers que l'on puisse capter date d'une époque où la température de l'Univers était partout égale à 3 000 °C, lorsque l'Univers était à peine âgé de 300 000 ans. À cette époque-là, il n'existait encore aucune étoile, aucune galaxie, aucune structure astronomique... juste des particules élémentaires et du rayonnement piégé. Il n'empêche que ce rayonnement a subitement jailli au bout de 300 000 ans et qu'on le détecte aujourd'hui sous la forme du fond cosmologique micro-ondes. Maintenant, pour explorer l'univers antérieur, il faut faire non plus de l'astrophysique, puisqu'on n'en a pas d'image électromagnétique, mais de la physique des hautes énergies. On recrée dans des accélérateurs de particules les conditions de température et d'énergie qui ont dû exister dans les premiers temps de l'Univers et on examine le résultat des expériences pour simuler en laboratoire l'état de l'univers primitif. Les physiciens ont pensé qu'en remontant suffisamment loin dans le passé énergétique de l'Univers, l'interaction électromagnétique et l'interaction faible devaient s'unifier en une seule interaction dite « électrofaible ». Selon les calculs, cela n'a pu se produire que lorsque la température de l'Univers était d'un million de milliards de degrés, quand l'Univers n'était âgé que d'un millième de milliardième de seconde. Pour vérifier ces prédictions en laboratoire, on a construit un gigantesque accélérateur de particules européen près de Genève, au CERN. Et la prédiction a été vérifiée – ce qui a valu le prix Nobel aux théoriciens qui l'avaient prédite et aux expérimentateurs qui l'avaient vérifiée. Maintenant, grande question : que s'est-il passé pendant le premier millième de milliardième de seconde ? On n'a aucune évidence expérimentale, il ne reste plus que le calcul théorique. On extrapole, on spéculé qu'à 10^{-35} seconde, l'interaction électrofaible s'unifie avec l'interaction forte. Et en continuant le raisonnement, on se dit que la gravitation finit, elle aussi, par s'unifier. Quand le fait-elle ? Pas au temps zéro. En réalité, le temps zéro n'a aucun sens. Le plus petit temps que l'on puisse imaginer en physique est 10^{-43} seconde, c'est le temps de Planck. Et c'est à ce temps-là que l'Univers aurait été régi par une interaction unique. Reprise dans le sens de la marche, l'évolution de l'Univers depuis le temps de Planck jusqu'à aujourd'hui est donc celle d'un refroidissement et d'une suite de brisures de symétrie, qui ont engendré les interactions fondamentales.

Auditeur : Y a-t-il d'autres théories que le Big Bang ?

J.-P. L. : Certes. On lit assez souvent, dans la presse de vulgarisation scientifique, que le Big Bang était remis en question. C'est très exagéré. Évidemment le Big Bang n'est qu'un modèle, il ne décrit pas la vérité, il n'y a d'ailleurs jamais de vérité en science, les modèles changent constamment. Mais le Big Bang est actuellement le

seul modèle plausible, parce que fondé sur une théorie de la gravitation satisfaisante, la relativité générale, et surtout compatible avec toutes les observations actuelles. C'est le seul modèle qui satisfasse à ces deux critères... Le problème, c'est que le Big Bang pose des interrogations qui sont à la limite du questionnement scientifique, et qui relèvent de la métaphysique, notamment l'existence d'un temps zéro, d'une création du monde, etc. Il est intéressant de réfléchir aux implications métaphysiques du Big Bang, mais ces réflexions, comme elles sont très subjectives, nuisent parfois à la crédibilité objective du modèle. En tout cas, certaines alternatives ont été proposées au modèle de Big Bang. Jusqu'à présent, aucune n'a tenu le choc de la confrontation avec les observations. Dans les années 1950, des astrophysiciens ont refusé de croire que l'Univers était en évolution. Ils ont imaginé un modèle « de l'état stationnaire » dans lequel l'espace était en expansion, mais créait en permanence de la matière, pour garder l'idée que la densité moyenne de l'Univers devait rester invariable au cours du temps. C'était un présupposé philosophique, n'est-ce pas ? Le modèle a été abandonné lorsqu'en 1965 on a découvert le vestige du Big Bang sous la forme du rayonnement fossile à $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, qui confirmait la théorie du Big Bang. Depuis il y a eu bien d'autres modèles alternatifs, mais chaque fois qu'on les a confrontés aux observations, ils ont échoué. Jusqu'à présent c'est toujours le modèle de Big Bang, amélioré par des petites variantes, qui reste le modèle satisfaisant pour décrire l'évolution de l'Univers.

Auditeur : En modifiant les théories d'origine, est-ce qu'on modifie toutes les théories physiques qui en découlent ?

J.-P. L. : Les théories d'origine sur lesquelles repose tout l'édifice du Big Bang, ce sont la relativité générale et la mécanique quantique. Si vous touchez à ces deux piliers fondamentaux, vous altérez toutes les conséquences. Ce que tentent de faire aujourd'hui certains théoriciens, c'est de construire une superthéorie mélangeant la gravité et la mécanique quantique pour obtenir un seul pilier pour toute la physique, de l'infiniment grand à l'infiniment petit.

Auditeur : Ce qui m'étonne, c'est la fragilité de la théorie du Big Bang ; elle ne repose pas sur une masse énorme de données.

J.-P. L. : Il y en a essentiellement quatre...

Auditeur : Si l'on part d'hypothèses qui sont vérifiées avec très peu de données, cela peut être assez dangereux, non ?

J.-P. L. : D'accord, mais il faut voir que si l'on modifie la relativité générale et la physique quantique pour aboutir à un modèle de gravité quantique, il n'y aura peut-être plus de Big Bang *stricto sensu*, c'est-à-dire pas de temps zéro, mais il n'empêche que le nouveau modèle ne sera pas très différent du précédent, car toute l'histoire longue de 15 milliards d'années à partir du premier milliè-

de milliardième de seconde, elle, ne sera pas changée. On ne peut pas modifier arbitrairement les théories de base, au point de changer cette portion d'histoire qui, elle, est vérifiée par les observations. Il n'est donc pas évident que le modèle de Big Bang soit si fragile que cela. Au contraire...

Auditeur : Y a-t-il des artistes contemporains que vous suivez et dont vous tenez compte, même indirectement, dans ce que vous faites ? Ou qui peuvent vous apporter des idées ?

J.-P. L. : L'art n'est pas un moteur de la recherche scientifique, c'est tout autre chose. Le travail scientifique est un travail de pointe, et par définition un travail de pointe, dans quelque discipline que ce soit, ne se trouve pas de façon évidente en correspondance avec d'autres domaines. Bien sûr, on peut trouver des analogies, mais uniquement *a posteriori*, quand on s'aperçoit qu'il y a des résonances avec tel tableau ou telle composition musicale. Il est assez rare que des développements scientifiques entiers naissent à partir d'œuvres artistiques.

Auditeur : Chez les Grecs, par exemple, il y a des ressemblances entre certaines représentations artistiques du monde et l'orientation des recherches.

J.-P. L. : Bien sûr ! J'aime cette idée que les développements de la science ne se font pas indépendamment du développement général des idées, à la fois dans la culture, dans l'art, mais aussi dans l'organisation des États, dans la situation politique, économique, religieuse... Il est difficile de faire des théories globales là-dessus, mais il est vrai qu'on pourrait réfléchir si les conditions sociales, politiques, économiques et culturelles à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle ont favorisé l'éclosion de la théorie de la relativité générale, du Big Bang et de la mécanique quantique.

Auditeur : Puisqu'il y a un observateur, on ne peut pas éluder la question sociologique, même en physique...

J.-P. L. : Je suis d'accord. Et pour l'illustrer, je vais vous raconter comment s'est passée l'invention du Big Bang. Entre les années 1910 et 1920, la théorie de la relativité existait déjà, et Einstein a cherché un modèle d'univers qui serait la solution de ses équations. Il a trouvé quelque chose qu'il a jugé inacceptable : il a trouvé justement la possibilité que l'Univers soit en expansion. Or, Einstein était culturellement ancré dans l'idée que l'Univers était donné une fois pour toutes, qu'il était statique et invariable dans le temps. Il a donc introduit dans ses équations un terme mathématique supplémentaire pour empêcher l'expansion de l'Univers. C'est le premier modèle cosmologique d'Einstein, qui date de 1917. Quelques années après, grâce à d'importants soutiens financiers apportés par des mécènes, des astronomes américains ont construit de très grands télescopes et ont

commencé à observer les galaxies très lointaines. Ils se sont aperçus que toutes les galaxies avaient un décalage spectral vers le rouge, ce qui signifiait, en vertu de l'effet Doppler, qu'elles s'éloignaient systématiquement de nous. Cela paraissait incroyable ! De plus, elles semblaient s'éloigner d'autant plus vite qu'elles étaient plus loin. C'est ce qu'on appelle la « loi de Hubble ». En fait, l'idée d'expansion de l'Univers était contenue en germe dans la théorie de la relativité, mais Einstein et d'autres théoriciens avaient refusé de le voir. Et quand la découverte a été faite par hasard par les astronomes, à leur tour les astronomes n'ont pas voulu l'accepter : Hubble n'a jamais voulu croire que l'espace était en expansion ! Mais dès qu'il a publié les résultats de ses observations du décalage vers le rouge des galaxies, des théoriciens se sont dit : « Bon sang ! Il ne fallait pas introduire le fichu terme qu'Einstein a ajouté aux équations pour empêcher que l'Univers soit en expansion ! » Enfin, en 1927, un savant belge nommé Georges Lemaître a le premier compris comment la relativité générale expliquait parfaitement l'univers en expansion. C'est là que les problèmes sérieux ont commencé. Parce que Lemaître s'est dit que si l'Univers était en expansion, alors en extrapolant dans le passé, il avait dû y avoir un moment où l'Univers était né de rien, voici quelques milliards d'années. Lemaître a donc conclu que l'Univers, l'espace, le temps et la matière étaient nés d'un événement singulier initial, qu'il a appelé l'« atome primitif ». C'était en 1931. Cela montre l'imbrication entre les croyances philosophiques et religieuses et l'élaboration des modèles scientifiques. Lemaître n'était pas seulement un génial mathématicien, il était aussi prêtre, plus précisément chanoine à Louvain, en Belgique. Pensez donc ! Un religieux ! Ses collègues scientifiques l'ont immédiatement soupçonné de vouloir justifier le récit de la Genèse : la création de l'Univers à partir de rien. Ils lui ont dit : « Votre modèle est mathématiquement juste, mais physiquement cela ne peut pas marcher parce que cela évoque trop la création du monde. » Lemaître s'est défendu de vouloir mélanger la religion et la science. Il était sincère, et pourtant il est mort en 1966, quasiment oublié de ses contemporains, alors qu'il avait inventé la plus grande théorie scientifique du siècle. Une semaine avant de mourir, un de ses assistants va le voir sur son lit d'hôpital et lui dit : « Monseigneur Lemaître, vous aviez raison ! On vient de trouver dans le ciel la preuve de l'atome primitif ! » C'était le rayonnement fossile à -270°C , vestige de l'univers chaud primordial. À partir de là, presque tout le monde s'est rué sur le modèle de Big Bang. Vous voyez que la façon dont les idées scientifiques finissent par s'imposer est toujours liée à des problèmes de société, de croyance, de présupposés culturels et philosophiques. Des chercheurs comme Einstein, par exemple, fantastiquement perspicaces dans certains raisonnements, ont eux-

mêmes des blocages culturels. D'ailleurs, Einstein l'a reconnu plus tard : « J'ai fait la plus grande erreur de ma vie : ne pas reconnaître dans mes équations que l'univers était en expansion ! » Il a été tellement dégoûté par son erreur qu'il a cessé de faire de la cosmologie. Inversement, Lemaître a découvert le Big Bang avec une intuition extraordinaire mais il est resté ignoré de son vivant parce qu'on l'a accusé de vouloir promouvoir ses croyances religieuses. Et même aujourd'hui que le Big Bang est accepté, qui connaît Georges Lemaître ? Cela semble bien injuste, mais toute l'histoire des sciences fourmille de ce genre d'injustices !

Auditeur : C'est peut-être de l'histoire ancienne, mais même ce terme de Big Bang était au départ péjoratif.

J.-P. L. : Absolument ! Le principal adversaire de la théorie du Big Bang était un astronome britannique très connu, Fred Hoyle. Dans les années 1960, il faisait une émission de radio pour vanter les mérites de son propre modèle, l'univers stationnaire, et il a qualifié le modèle de Lemaître de Big Bang, c'est-à-dire « Grand Boum », pour se moquer. Le mot a fait fortune, et aujourd'hui tout le monde l'a adopté.

Auditeur : On a posé une question sur la manière dont vous regardez les artistes qui travaillent sur l'espace.

J.-P. L. : Tous les artistes travaillent sur l'espace.

Auditeur : Oui, comme Lucio Fontana, cet artiste italien qui a lancé des concepts spatiaux dans son œuvre, avec comme des toiles trouées, vous savez. Vous qui êtes un scientifique, comment vous réagissez ?

J.-P. L. : En principe je ne regarde pas les tableaux avec l'œil du scientifique.

Auditeur : Arrivez-vous à faire abstraction de votre métier en regardant une œuvre de Fontana ou de Jackson Pollock ?

J.-P. L. : Je n'ai jamais établi le moindre rapport entre l'œuvre de Pollock (que je connais et apprécie relativement) et mon travail. D'une manière générale, quand je contemple des œuvres d'art, je ne prête aucune attention à un possible codage d'informations scientifiques. Je laisse aller mon émotion et mon sens esthétique.

Auditeur : Cela ne vous apprend jamais rien pour votre métier ?

J.-P. L. : Pas directement. Mais on apprend toujours d'une certaine façon, ne serait-ce que par l'enrichissement intérieur que cela procure. Quand je vois une œuvre d'art qui me touche, cela enrichit mon imaginaire. Or il faut savoir que la recherche scientifique de pointe fait appel à l'imaginaire. L'imaginaire d'un scientifique qui fréquente régulièrement les œuvres d'art s'enrichit de tous ces apports, et un jour, cela peut l'ouvrir sur une création dans le domaine scientifique. Ces influences sont très subtiles. En ce qui me concerne, je pense qu'effectivement il y a eu, dans mon histoire passée, tout un

enrichissement culturel qui m'a poussé à travailler dans certaines directions, à savoir le rapport entre la réalité et les illusions d'optique. Avec l'idée que nous sommes en permanence plongés dans l'illusion, comme le suggèrent nombre d'ouvrages philosophiques. Il y a une première illusion qui s'intercale entre le réel et le perçu : c'est notre système visuel, qui fait filtre, et brouille les données brutes du réel. Mais cela concerne plutôt les physiologistes. Le but de ma recherche en physique, ce sont les illusions engendrées non pas par l'imperfection de nos sens, mais par la nature même du monde : ce n'est pas seulement notre système mental qui brouille le réel : c'est la nature même du monde qui est voilée. Un exemple très connu est la théorie de la mécanique quantique. Le pilier de base de cette théorie est ce qu'on appelle le « principe d'incertitude ». Pour résumer, il contient l'idée que les propriétés réelles des particules élémentaires sont à jamais inaccessibles, qu'elles sont cachées derrière une sorte de voile. Avec les univers chiffonnés, j'ai trouvé intéressant de chercher une sorte de principe général d'incertitude qui agirait cette fois au niveau cosmique. Avec des illusions engendrées non par notre système visuel, mais par la forme même de l'espace. Or, bien avant de m'engager dans ces recherches, j'avais été fasciné par des œuvres contenant des jeux d'illusion. Par exemple Salvador Dalí. C'est au XX^e siècle que les artistes ont poursuivi le plus de recherches sur les figures ambiguës et les architectures spatiales déroutantes...

Auditeur : Selon vous, ces figures ambiguës ont-elles d'une manière ou d'une autre un rapport avec la logique de la contradiction ? Je veux parler de ces théories des années 1950 essayant de concilier deux théories de types opposés. Ils prenaient la théorie de la lumière en exemple et disaient *grosso modo* : c'est une onde, mais c'est en même temps une projection de particules.

J.-P. L. : Ce n'est contradictoire qu'au premier niveau. Dans la théorie quantique, les aspects ondulatoire et corpusculaire ne sont absolument pas contradictoires – au contraire, ce sont des aspects complémentaires, ce qui n'est pas du tout la même chose. La complémentarité, ce n'est pas la contradiction ! On visualise une onde comme une vague et un corpuscule comme une petite bille. Ces deux représentations ont l'air antagonistes, mais à un niveau plus profond, en l'occurrence celui des équations de la mécanique quantique, on voit apparaître les deux aspects. C'est bien cette complémentarité qui est forte, et qui aujourd'hui donne des résultats dans tous les domaines où elle s'applique. En revanche, au sujet des figures impossibles, il me semble qu'il faut retenir l'idée d'objet et de « non-objet » : un objet qui semble pouvoir exister, et qui en fait n'existe pas. Ce qui, d'après moi, se rapproche plutôt de concepts psychanalytiques. Quand j'en ai parlé à un ami psychanalyste, il m'a dit : « Cela me rappelle l'injonction

paradoxe. » Je crois que c'est Lacan qui a le plus développé cette question : en de nombreuses situations, dans la vie mentale d'un individu, il est confronté à deux situations qui semblent totalement conflictuelles, et le problème de l'individu c'est soit de faire un choix, soit de s'apercevoir qu'en fait ces deux propositions ne sont pas contradictoires. Dans le cas du choix, il faut évidemment faire le deuil de ce qu'on laisse de côté.

Auditeur : Pour revenir à la logique contradictoire, on pourrait peut-être dire qu'elle essaie tout simplement de lier deux domaines sans grande nécessité... C'était le début des années 1950.

J.-P. L. : À cette époque, en effet, la mécanique quantique n'avait pas complètement réalisé l'importance de la complémentarité.

Auditeur : La mécanique quantique est une approche fondamentaliste. Elle veut résoudre en allant plus profond, ou en le croyant tout au moins, plutôt que d'avoir une approche globalisante... Mais tout à l'heure, on voyait bien que la question du Big Bang était conditionnée par d'autres théories, et donc qu'elle se vérifiait de manière globale, et non pas spécifique.

J.-P. L. : Que voulez-vous dire par là ? La mécanique quantique joue un rôle fondamental dans les idées d'unification. Elle s'est développée à peu près à la même époque que la relativité générale. Ces deux théories contemporaines ne sont toutefois pas compatibles. Toute sa vie, Einstein lui-même a essayé de les rendre telles, il n'y est pas parvenu. Aujourd'hui encore, les physiciens essaient de marier la théorie de la relativité et la mécanique quantique, sans y parvenir. Toujours est-il que les deux théories régissent des phénomènes de l'Univers qui sont *a priori* différents, puisque la relativité générale régit les phénomènes de gravitation, donc les phénomènes de nature astronomique, tandis que la mécanique quantique régit les interactions entre particules élémentaires, à un niveau où la gravitation n'intervient pas. Pour décrire les systèmes physiques, on fait appel soit à l'une, soit à l'autre. On ne mélange pas les deux. Disons que dans 99,9 % des cas, on ne mélange pas. Évidemment, il y a des phénomènes particuliers qui se trouvent à la charnière des deux théories, et les meilleurs exemples sont justement les trous noirs et le Big Bang. C'est la raison pour laquelle j'en ai parlé si longuement. Qu'est-ce qui se passe au fond des trous noirs ? Il y a à la fois de la gravitation, puisque les trous noirs sont le résultat d'un effondrement gravitationnel gigantesque, mais comme la matière effondrée converge vers une singularité centrale, il doit forcément y avoir un moment où les phénomènes deviennent régis également par la mécanique quantique. Comment ? On n'en sait rien. C'est exactement pareil pour le Big Bang : si tout l'ensemble de la matière de l'Univers est indéfiniment compressée à mesure qu'on s'approche du Big Bang, cela

veut dire que la mécanique quantique, qui n'intervient pas dans l'univers d'aujourd'hui à grande échelle, devait en revanche jouer un rôle fondamental au tout début de l'Univers, quand il était extraordinairement petit, chaud et dense. Et c'est justement en construisant une théorie unifiée qui marie la relativité générale et la mécanique quantique que l'on dégage de nouvelles idées étranges, comme celle de l'écume de l'espace-temps, ou de brisure spontanée de symétrie.

Si, au siècle prochain, une équipe de physiciens géniaux élabore une théorie satisfaisante de la gravité quantique qui réussirait à décrire l'univers primordial ou le centre des trous noirs, ils seront peut-être amenés à supposer qu'à cette époque, l'espace avait 10 dimensions, et qu'ultérieurement, en un temps extraordinairement bref, parmi ces 10 dimensions, trois se sont dilatées pour devenir les dimensions normales de l'espace, tandis que sept autres sont restées toujours à la longueur minuscule de 10^{-33} centimètre. Ce qui voudrait dire qu'aujourd'hui, il y aurait trois dimensions d'espace perceptibles parce qu'elles sont à notre échelle, et sept complètement inaccessibles. On retombe donc dans une approximation de la relativité générale et de la mécanique quantique telles qu'elles existent aujourd'hui. Ce qui ne veut pas dire qu'on ne puisse plus toucher à ces deux piliers, mais disons qu'à mesure que la science se construit et s'avère de plus en plus efficace pour décrire les phénomènes naturels, il devient de plus en plus difficile de remettre en question ses fondations... Imaginons que demain, dans un laboratoire quelconque, on découvre un phénomène totalement incompris qui oblige à réviser le fondement même des choses... Ce n'est pas impossible, ce serait même hautement excitant ! Il faudrait peut-être reconstruire les trunks de base, mais en s'assurant que tout un ensemble de ramifications resteraient correctes. Parce qu'il faudra bien continuer à expliquer le mouvement des planètes, par exemple... Souvenons-nous que la théorie de la relativité a remplacé conceptuellement la théorie de l'attraction universelle de Newton, mais que dans la pratique, la théorie de Newton donne encore de très bons résultats pour calculer les trajectoires des planètes autour du Soleil autant que celles des satellites artificiels qu'on envoie dans l'espace. Avec les lois de l'attraction universelle de Newton, dont on sait pourtant que ce n'est pas la meilleure théorie de la gravitation, on fait quand même des calculs suffisamment précis pour envoyer une sonde se poser sur la Lune avec une précision de dix mètres.

Nous arrivons à la fin de cette journée. Cela a été un grand plaisir pour moi d'avoir pu développer quelques-uns de mes sujets favoris devant un auditoire non spécialisé. Vous avez eu le courage de m'écouter pendant de nombreuses heures. Entre collègues, nous parlons un jargon beaucoup plus technique. Ici j'ai évité les termes

techniques et j'ai cherché des équivalents visuels. C'était très enrichissant pour moi aussi.

Auditeur : Vous dessinez un chemin.

J.-P. L. : Ah oui, c'est cela ! Ce chemin, c'est en quelque sorte l'émergence de la complexité. On part d'un tronc unique, et des branches commencent à pousser, puis des feuilles. La diversité s'introduit dans l'Univers, mais l'unité demeure en même temps.

1- Session du lundi 19 juin 1995 donnée à l'Institut des hautes études en arts plastiques (Paris).

2- Depuis la date de cette conférence, de nouvelles observations astronomiques obtenues à partir de 1998 permettent de trancher entre les alternatives théoriques : il semblerait que l'Univers soit en expansion perpétuelle accélérée, son contenu matériel étant largement dominé par la forme d'énergie « explosive » attribuée au vide quantique ! *[Note ajoutée pour la présente édition]*.

3- En 1990, le critique d'art américain Albert Boime avait déjà eu l'idée d'effectuer cette recherche, mais pour la seule nuit du 19 juin, ce qui n'est évidemment pas la bonne date à chercher ; la reconstitution du ciel qu'il donne est inexacte.

4- Je ne me doutais pas qu'une telle surprise viendrait avec les observations du satellite WMAP publiées en 2003, voir article « La forme de l'Univers », p. 196 *[Note ajoutée pour la présente édition]*.

Ombre et lumière¹

De l'astrophysique à la philosophie

Je me réjouis d'être revenu, ne serait-ce que brièvement, tout près de ma région natale pour vous parler d'un sujet qui m'a toujours remué, c'est-à-dire le rapport entre la lumière et l'ombre. En écoutant l'intervention précédente, j'ai été très sensible à la description littéraire faite par cette jeune aveugle du XIX^e siècle, une description extrêmement tactile d'un ciel bleu ou noir qu'elle n'a jamais vu. Pour moi, il s'agit là d'une sorte de cécité voyante, parce que l'œil humain doué de la vue, lorsqu'il regarde le ciel nocturne, voit essentiellement du noir parsemé çà et là des quelques petites taches lumineuses que sont les étoiles.

Le fond de ciel que vous pouvez voir [cahier 2, figure 9](#) ne peut pas être perçu par l'œil humain. Seuls en sont capables les très grands télescopes d'aujourd'hui, qui ont la capacité de sonder les immensités cosmiques. Vous voyez quelques étoiles brillantes, mais surtout les milliers de petits points qui sont des objets extraordinairement lointains, en l'occurrence des galaxies à part entière, chacune contenant des centaines de milliards d'étoiles et que l'œil humain ne peut pas distinguer. Cette toile de fond ressemble bien, finalement, à ce tissu d'espace pailleté de taches de lumière qui était si bien décrit par cette jeune aveugle. Nous ressentons quasiment une impression tactile, comme s'il s'agissait d'une tapisserie que l'on a envie de toucher avec les doigts.

Cette image me renvoie aussi à ma propre expérience de jeunesse. Je suis né à vingt kilomètres de là, à Cavaillon. Très jeune, dans mon jardin, j'observais le ciel, à une époque où justement l'éclairage urbain permettait encore de le faire. Ce n'était pas un ciel aussi lointain que celui capté dans cette image télescopique, puisque l'œil humain ne peut percevoir au mieux que quelques milliers d'étoiles, et non pas des centaines de milliers comme dans le cliché que je vous montre. Je me souviens que ce qui m'intéressait déjà, en dehors de la beauté évidente du paysage cosmique avec ses joyaux de lumière, ce qui m'intriguait, c'était ce qu'il y a entre les étoiles ; ce n'était pas la partie lumineuse de l'Univers, mais sa partie obscure. En

réalité, la question qui m'agitait, c'était l'espace, le noir qu'il y a entre les étoiles. Qu'est-ce ? J'ai fait mienne, depuis, cette magnifique citation d'Héraclite, philosophe du VI^e siècle av. J.-C. selon lequel la nature aime se cacher et la beauté de l'invisible est plus belle que la beauté du visible. C'est en partie le but, aujourd'hui, du physicien théoricien, de l'astrophysicien et du cosmologiste que je suis devenu, que de répondre à ces interrogations de mon jeune âge sur les rapports entre l'ombre et la lumière. C'est la raison pour laquelle, trente ans après ces expériences, je travaille dans un observatoire, celui de Paris-Meudon, et dans un laboratoire au nom assez significatif, le Laboratoire Univers et Théories ; car, vous le verrez, au-delà des télescopes qui ne captent que quelques épingles de lumière dans un univers beaucoup plus vaste et essentiellement obscur, c'est la pensée pure et la physique fondamentale qui permettent de percevoir ce qu'il y a au-delà de la lumière. Univers et Théories, dont le joli acronyme donne le mot LUTH. Ce n'est pas un hasard. Nous travaillons, d'une certaine façon, à décoder la partition de lumière de l'Univers qui nous raconte, justement, ce qu'il y a au-delà de la lumière. D'autre part, moi qui me suis toujours élevé contre les clivages entre la science, les arts et la littérature, j'ai cette fascination pour l'ombre et la lumière. Je l'ai transcrite à différentes étapes de mon parcours et notamment dans quelques-unes de mes réalisations graphiques. L'une d'entre elles, une lithographie datant de 1992, s'appelait déjà *Ombre et lumière*. Cette problématique *ombre et lumière* que je pratique constamment dans mon métier, je l'ai aussi exprimée – pardonnez-moi de faire une autocitation – dans mon dernier recueil de poésie, *Itinéraire céleste*, où j'écris, entre autres : « Le firmament, ce fluide où baignent les étoiles, nous paraît sombre et sa lumière est trop subtile pour nos yeux. » Si je vous cite mon propre recueil, ce n'est pas par coquetterie d'auteur, mais parce que c'est exactement le sujet d'aujourd'hui.



Lithographie *Ombre et lumière.*

Dans ma carrière d'astrophysicien, j'ai essentiellement travaillé sur le noir, et j'ai en particulier cherché à savoir comment le noir de l'Univers nous révèle sa nature extrêmement profonde. Aujourd'hui, l'essentiel de notre compréhension de l'Univers repose non plus sur la lumière, contrairement à ce que l'on pourrait penser, mais sur ce qu'il y a au-delà de la lumière. C'est l'une des raisons pour lesquelles j'ai commencé à travailler, professionnellement, sur les objets qui sont par définition invisibles : les parangons de la noirceur que sont les trous noirs. J'ai d'ailleurs une petite anecdote à ce propos. Je m'appelle Luminet, un rapport évident avec le sujet. Parmi les premières publications scientifiques qui m'ont fait connaître dans la communauté internationale, j'ai écrit un article très technique qui, grâce à des calculs d'ordinateur, essayait de visualiser l'invisualisable, à savoir le fameux trou noir. Il s'agissait en fait de calculer comment le noir du trou faisait briller son environnement, essentiellement du gaz qui se trouve autour. L'anecdote amusante est la suivante. À l'époque, j'étais un tout jeune chercheur et, hormis mes collègues de laboratoire, personne ne me connaissait dans la communauté internationale. Cet article portait un titre anglais compliqué voulant dire, *grosso modo*, « visualisation du disque de gaz lumineux autour

d'un trou noir », et signé Luminet. Comme je l'ai appris plus tard, nombre de mes futurs collègues ont pensé que le nom d'auteur était un pseudonyme ! Signer Luminet pour montrer pour la première fois un trou noir paraissait être un bon jeu de mots. Ce n'en était pas un, et je suis très fier du nom que je porte, qui renvoie à l'idée de lumière !

Qu'est-ce que la lumière ? Ce sujet a été débattu, à la fois scientifiquement et philosophiquement, depuis trois millénaires, puisque déjà, à l'époque des Grecs, il existait des théories sur la lumière. J'ai toujours aimé cette idée que quelques-uns des philosophes grecs les plus importants, comme Platon, imaginaient que la lumière n'était pas un phénomène physique en soi, mais une émanation de notre regard. Platon croyait que notre œil projetait les rayons lumineux qui permettaient d'éclairer les objets. Cette idée est extrêmement poétique, mais elle ne marche pas du tout ! Comment expliquer les ombres par exemple ?

Toujours est-il que la conception de Platon s'est imposée. Pourtant, d'autres philosophes importants de l'Antiquité, notamment les fameux atomistes Démocrite et Épicure, avaient eux compris que la lumière était un phénomène indépendant de l'œil, et qu'elle était probablement composée de petits grains, qu'ils ont appelés atomes, qui se propageaient dans l'espace et qui, en pénétrant dans notre œil (on ne connaissait pas encore la rétine) créaient une sorte de simulacre en modèle réduit de l'objet émettant ces rayons lumineux. Les contradicteurs de cette théorie disaient simplement : mais comment voulez-vous qu'un objet aussi gros qu'une montagne puisse rentrer dans l'œil sous forme de simulacre ? Il a fallu attendre le XI^e siècle ap. J.-C., c'est-à-dire 1 500 ans, pour qu'un grand savant arabe nommé Ibn al-Haytham, plus connu en Occident sous le nom d'Alhazen, revienne à la conception des atomistes en remarquant tout simplement que nous avons des impressions rétinienne : si nous fixons fortement une lumière pendant quelques secondes, quand on ferme les yeux, cette image reste inscrite quelques instants dans le cerveau. Cela prouvait que ce n'est pas le regard qui émet la lumière, mais que celle-ci est bien un phénomène produit à l'extérieur, qui pénètre notre œil et laisse une rémanence des images. Voilà le début de l'aventure scientifique sur la compréhension de la lumière.

C'est une longue histoire que je ne vais pas vous raconter en entier, simplement deux épisodes majeurs dans notre compréhension de la lumière.

Le premier, c'est la découverte, par Isaac Newton à la fin du XVII^e siècle, que la lumière ordinaire, c'est-à-dire la lumière dite blanche – celle par exemple qui est émise par le Soleil – est en fait une superposition de couleurs. Pour s'en rendre compte, Newton a utilisé un prisme pour obtenir, pour la première fois de l'histoire, ce que l'on

appelle un spectre. Le spectre, c'est donc l'étalement de la lumière sous ses différentes longueurs d'onde. À l'époque de Newton, on ignorait encore la notion de longueur d'onde. Il a simplement mis en évidence que les fameuses couleurs de l'arc-en-ciel, de l'indigo jusqu'au rouge, ne sont en fait que les couleurs de la lumière blanche étalées par le spectre. Et pour bien montrer qu'il ne s'agissait pas d'un artifice dû au prisme interposé, il a utilisé un deuxième prisme pour faire reconverger les rayons de différentes couleurs et il a obtenu, à nouveau, la lumière blanche. Cela a été une première étape capitale pour comprendre que la lumière blanche contient en elle-même la superposition des couleurs, ce que les peintres savent.

Une deuxième étape fondamentale dans la compréhension de la lumière – un peu plus technique cette fois mais il faut en parler car la civilisation moderne repose en grande partie dessus – est la théorie électromagnétique. C'est le savant écossais James Clerk Maxwell qui, en 1873, a compris que la lumière visible n'est qu'une infime partie d'un phénomène physique beaucoup plus général, le rayonnement électromagnétique. Il s'agit de la propagation et de la vibration d'un corpuscule de lumière appelé photon. Cette vibration est caractérisée par une fréquence ou par une longueur d'onde. Maxwell a découvert que le rayonnement électromagnétique se décline sous toutes les longueurs d'onde possibles et imaginables, et ce que nous appelons lumière visible n'est que la toute petite fraction du rayonnement électromagnétique à laquelle notre œil est sensible. Notre rétine ne capte qu'un infime intervalle de longueurs d'onde. La plaque photographique a d'ailleurs à peu près la même sensibilité que l'œil. Par là même, Maxwell a mis en évidence, pour la première fois, des formes de lumière invisibles à nos yeux.

L'une des tâches des astronomes du XX^e siècle a consisté à fabriquer des instruments capables de détecter les lumières invisibles, car celles-ci sont produites à profusion par tous les astres du ciel, à commencer par le Soleil. Dans le domaine des très grandes longueurs d'onde, la lumière correspond aux ondes radio. Quand vous descendez en longueur d'onde, vous obtenez les micro-ondes. Les ondes radio servent évidemment à la transmission de la radio et de la télévision, tandis que les micro-ondes sont effectivement le type de rayonnement qui est utilisé pour la cuisson rapide des aliments dans les fours du même nom.

Lorsqu'on raccourcit encore les longueurs d'onde, mais toujours en restant dans le domaine de l'invisible, nous arrivons à l'infrarouge. Notre œil ne le perçoit pas, mais notre peau peut le ressentir. C'est le rayonnement dit thermique : vous allumez un poêle, vous sentez sur votre peau une sorte de chaleur parce que vous recevez des photons infrarouges que votre œil ne peut voir, mais vous avez des capteurs

d'infrarouge dans votre peau. C'est l'une des raisons pour lesquelles les militaires, par exemple, ont développé des détecteurs à infrarouge qui permettent de voir, la nuit, des êtres vivants ; par exemple, la température interne du corps humain, 37 °C, se voit bien en infrarouge la nuit.

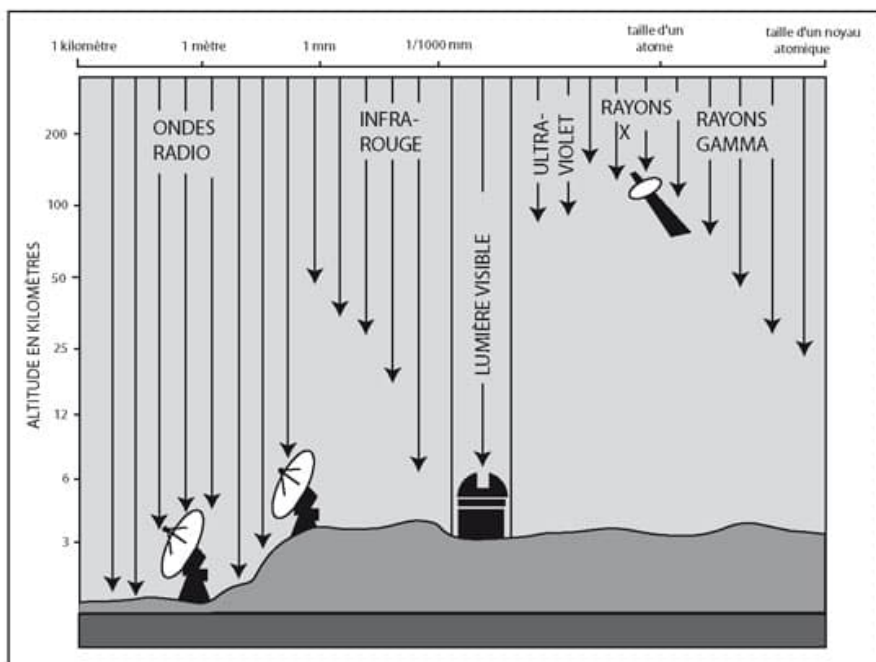
Vous arrivez ensuite à la fenêtre du visible. C'est une fente extrêmement étroite dans le spectre infini des longueurs d'onde. Pour mémoire, les longueurs d'onde du visible se situent entre 0,4 et 0,8 micron. Le micron étant le millième de millimètre, c'est bien un intervalle très mince, qui lui-même se décompose en les couleurs de l'arc-en-ciel.

Sortons à nouveau de la lumière visible pour entrer dans l'ultraviolet. C'est une lumière de plus courte longueur d'onde et de plus haute fréquence, qui transporte donc plus d'énergie. Elle commence à devenir pénétrante et, de ce fait, dangereuse. Le rayonnement ultraviolet est responsable du bronzage mais, comme vous le savez, il peut provoquer des cancers de la peau. Les rayonnements encore plus pénétrants et énergétiques sont appelés les rayons X. Ils sont notamment utilisés dans l'imagerie médicale pour faire des radiographies puisqu'ils pénètrent les chairs pour donner des images des os. Enfin, les rayons les plus pénétrants de tous sont les rayons gamma. Ils sont associés aux phénomènes les plus énergétiques de l'Univers, par exemple les explosions d'étoiles. On les produit aussi à l'échelle humaine dans les bombes atomiques et les centrales nucléaires. Dans un registre plus pacifique, on l'utilise aussi en chirurgie comme une sorte de scalpel ultraprécis pour détruire une à une les cellules cancéreuses.

Vous constatez donc cet éventail extraordinaire de toutes les lumières dont notre œil, finalement, ne perçoit qu'une fente bien étroite. Aujourd'hui, les techniques de l'astronomie ont permis d'ouvrir la totalité des fenêtres sur l'Univers en exploitant l'ensemble du spectre électromagnétique. C'est comme si pendant des siècles nous avions vécu dans une pièce circulaire entièrement fermée par des volets à l'exception d'une étroite fente, celle de la lumière visible, à travers laquelle nous n'aurions vu qu'une infime partie du paysage cosmique ; aujourd'hui, grâce à des détecteurs adaptés, tous les volets sont ouverts et l'on observe le paysage sous toutes ses longueurs d'onde, toutes ses facettes. On y découvre un univers beaucoup plus riche et intéressant que ce que distinguait notre œil, même équipé d'un télescope optique.

Un deuxième élément d'importance pour les astronomes est que, même si les astres émettent généralement des rayonnements sous toutes les longueurs d'onde, la plupart ne parviennent pas au sol – heureusement d'ailleurs, sinon nous ne serions pas là pour en parler

parce qu'il n'y aurait pas de vie sur Terre. Comme l'illustre le schéma ci-dessous, on voit en bas le niveau de la mer, ensuite on monte en altitude et on rencontre les couches supérieures de l'atmosphère. On constate que les seules bandes de rayonnement qui parviennent au sol sont le rayonnement radio, une petite partie des micro-ondes, et évidemment la lumière visible. Tous les autres rayonnements sont essentiellement arrêtés par les couches de l'atmosphère, à des altitudes plus ou moins élevées. C'est la raison pour laquelle, pour capter ces rayonnements venus des astres lointains, il a fallu attendre le développement de l'ère spatiale dans les années 1970 pour pouvoir embarquer des détecteurs au-dessus de l'atmosphère terrestre et obtenir enfin des visions de l'Univers dans l'ultraviolet, l'infrarouge, les rayons X et gamma. Auparavant, on ne soupçonnait pas que l'Univers pouvait contenir des astres aussi énergétiques, capables de produire de telles quantités de rayons X et de rayons gamma.



Absorption atmosphérique.

Pour vous montrer de façon plus palpable le changement de vue que l'on a d'un objet céleste donné quand on l'observe sous différentes longueurs d'onde, voici l'astre qui nous est le plus familier, le Soleil. En lumière visible, il prend l'aspect d'une boule de couleur jaune, parce que la surface du Soleil est à 6 000 °C, et il y a une correspondance entre les températures et les couleurs. Je ne parle pas bien entendu des couleurs que l'on utilise pour peindre les murs, je

parle des couleurs des étoiles. Donc, le jaune, c'est 6 000 °C, le bleu, c'est 10 000 °C, le rouge c'est 2 000 °C. Si maintenant vous observez le Soleil avec un radiotélescope, c'est-à-dire en ondes radio, vous constatez que son « image » (reconstituée en fausses couleurs pour être visualisée) n'est même plus sphérique. Cela veut dire que vous « voyez » d'autres régions du Soleil qui émettent préférentiellement leur lumière dans le domaine radio. Si vous observez le Soleil dans l'ultraviolet, vous découvrez encore un Soleil différent, avec notamment un grand trou appelé trou coronal, qui s'explique par des mécanismes complexes de la physique solaire. Vu dans un télescope à rayons X, le Soleil est à nouveau différent et ne montre que ses régions émissives en rayons X, qui sont en fait les taches solaires et les zones où se déploient des éruptions gigantesques de plasma à très haute température. Vous voyez que pour apprécier toutes ces images complémentaires du Soleil, qui nous apprennent différentes facettes de son fonctionnement, il suffisait simplement de chausser les lunettes adéquates (voir [cahier 2, figure 10](#)).

Je vais maintenant vous parler des origines de la lumière. L'origine de celle du jour vient du Soleil. *A priori*, on peut croire qu'elle vient de la surface du Soleil, mais en fait cette lumière est engendrée au centre. Le Soleil étant une étoile – et c'est la définition même d'une étoile –, il engendre sa propre lumière, contrairement aux planètes ou à la Lune, qui ne font que réfléchir la lumière qui émane du Soleil. En son centre, la température est tellement élevée qu'elle permet la génération de lumière par des réactions thermonucléaires. Le Soleil, comme toutes les étoiles, est essentiellement composé d'un carburant qui est de l'hydrogène, et l'on sait depuis les années 1930 qu'à une température de 15 millions de degrés, la température qui règne au centre du Soleil, les noyaux d'hydrogène fusionnent quatre par quatre pour produire un autre élément nommé hélium, la réaction libérant une énergie phénoménale. C'est cette énergie nucléaire qui engendre la lumière du Soleil. À 15 millions de degrés, la lumière originelle du Soleil est du rayonnement gamma pur, une sorte de bombe atomique autocontrôlée. Le Soleil possède cependant une vaste atmosphère, moins chaude que le cœur, si bien que la lumière du centre doit traverser les 700 000 kilomètres de couches du Soleil avant de parvenir en surface. Vous savez que la lumière circule à 300 000 kilomètres par seconde dans le vide, mais dans le Soleil ne règne pas le vide : il y a un gaz de particules électrisées qui dévient constamment le trajet de la lumière. Le petit photon, grain de lumière émis à 15 millions de degrés au centre du Soleil, va avoir une sorte de parcours en zigzag, constamment dévié de son chemin par les interactions avec des particules du Soleil. De ce fait, le photon met en moyenne 10 millions d'années pour arriver à la surface, et non pas

deux secondes et quelques ! Cela change quelque peu la perspective que l'on a sur le Soleil. Dites-vous bien que la lumière que vous voyez du Soleil, c'est la lumière de sa peau seulement. Arrivée à ce niveau, elle a perdu l'essentiel de son énergie d'origine. Elle n'est plus qu'à 6 000 °C, et c'est pour cette raison que notre étoile nous paraît jaune. C'est une lumière dégradée qui a perdu l'information sur ses conditions initiales.

Le Soleil est opaque à la lumière, et ce ne sont que les théories de la physique nucléaire qui ont permis de comprendre, dans les années 1930, la véritable origine de sa lumière. Aujourd'hui, on dispose d'instruments tout à fait extraordinaires qui permettent de voir directement le cœur du Soleil : ce sont des télescopes très particuliers qui ne détectent pas le rayonnement électromagnétique, mais des particules élémentaires appelées neutrinos. Ils sont émis à profusion par les réactions thermonucléaires au centre des étoiles et évacuent à peu près la même quantité d'énergie que les photons, à la différence près qu'ils sont « aveugles » à la matière. Les neutrinos émis au centre traversent donc les couches gazeuses du Soleil comme si c'était le vide, en deux secondes environ, alors que la lumière met 10 millions d'années. Une fois à la surface du Soleil, il reste encore 150 millions de kilomètres de vide interplanétaire à parcourir pour parvenir à la Terre, ce qui se fait en environ huit minutes, aussi bien pour les photons que pour les neutrinos.

Ainsi, quand on observe le Soleil sous sa forme lumineuse, on voit en fait un rayonnement électromagnétique en décalage de 10 millions d'années, dont on a perdu les conditions initiales ; si on braque un détecteur de neutrinos, on voit quasiment le Soleil en direct. Si un méchant démon s'amusait à éteindre subitement le cœur du Soleil, il faudrait 10 millions d'années pour s'apercevoir d'une baisse de la lumière, mais un physicien des particules travaillant avec un détecteur de neutrinos vous dirait au bout de quelques minutes : « Tiens, le Soleil vient de s'éteindre. Il ne vous reste que 10 millions d'années pour en profiter ! »

Les magnifiques paysages de lumière que nous propose l'astronomie et que vous avez tous, un jour ou l'autre, admirés dans un atlas, sont des images recueillies par de très grands télescopes, qui non seulement collectent les faibles lumières des astres lointains, mais qui permettent en outre des temps de pose extrêmement longs, ce que notre œil est incapable de faire. L'œil est un récepteur exceptionnel, mais la persistance rétinienne est brève, de l'ordre du dixième de seconde, de sorte qu'il faut beaucoup de photons pour que l'impression lumineuse marque notre rétine. C'est la raison pour laquelle, lorsqu'on regarde un ciel nocturne, on ne voit que les petits points des étoiles. Si on augmente le temps de pose grâce à la

photographie, on commence à voir apparaître des nébulosités gazeuses autour des étoiles et puis, comme vous le verrez dans les images suivantes, en augmentant encore le temps de pose, on voit la lumière émerger progressivement de ce qui nous paraissait noir, c'est-à-dire du gaz extrêmement ténu qui emplit l'espace interstellaire.

Dans les beaux clichés astronomiques que je vous montre maintenant (voir [cahier 2, figure 11a](#)), on voit les couleurs des étoiles, liées comme je l'ai dit à la température qui règne à leur surface. Les étoiles bleues sont jeunes et chaudes, environ 10 000 °C. Les étoiles jaunes sont, disons, adultes, comme le Soleil, et rayonnent à environ 6 000 °C. Les étoiles rouges ou orangées sont plus froides, à 2 000 °C. Ce sont soit de toutes petites étoiles, soit des étoiles âgées qui, au cours de leur histoire, se sont dilatées en se refroidissant. Ainsi, rien qu'à travers l'observation des couleurs naturelles des étoiles, nous avons déjà des idées sur leur nature physique et leur degré d'évolution.

Moyennant un temps de pose suffisamment long, on voit émerger la lumière et les couleurs du milieu interstellaire ; celui-ci est composé de gaz, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, accompagné de quelques autres éléments sous forme de molécules, grains, etc. (voir [cahier 2, figure 11b](#)). Ces magnifiques paysages cosmiques avec leur prodigieuse palette de couleurs nous renseignent à la fois sur la température du milieu interstellaire et sur sa composition chimique ; en effet, selon qu'il s'agit d'hydrogène, d'hélium, de carbone, de fer, etc., ces éléments-là ne diffusent pas le rayonnement dans les mêmes couleurs. Ainsi, la vraie matière de l'espace n'est pas du vide peuplé de points lumineux que sont les étoiles, c'est une vraie matière, fluide, très peu dense, qui rayonne dans toutes les couleurs.

Voilà une autre image montrant un champ d'étoiles ressemblant à des paillettes dans le noir, et une grande zone obscure (voir [cahier 2, figure 11c](#)). On touche ici « du doigt », en quelque sorte, la problématique de l'ombre et de la lumière. En effet, cette zone obscure n'est pas une région où il n'y a rien, mais au contraire une région où énormément de gaz s'est accumulé, ainsi que des grains de poussière interstellaire qui absorbent la lumière visible. Résultat, le nuage nous paraît noir, comme un trou dans l'espace, mais en réalité ce n'est pas un trou, c'est un plein. Une sorte de grumeau dense. Or ces grumeaux denses sont la matrice des étoiles. C'est en leur sein que se forment les embryons stellaires. Pour vous en convaincre, voici une échographie de l'un de ces nuages noirs. En médecine, on utilise les rayons X pour les échographies, mais en astronomie, on utilise le rayonnement infrarouge. Quand on braque un télescope infrarouge en direction de l'une de ces matrices cosmiques, on voit effectivement des embryons d'étoiles (voir [cahier 2, figure 12a](#)). Ce sont des protoétoiles

qui ne sont pas encore formées, pas encore sphériques ; ces astres ne sont pas autonomes, ils ne sont pas sculptés par leur propre gravité, ils sont encore en interaction avec le gaz ambiant, un peu comme le fœtus dans son placenta. Ainsi, cette image extrêmement émouvante nous donne à voir des étoiles en train de naître dans l'obscurité.

Cette superbe image astronomique (voir [cahier 2, figure 12b](#)) montre maintenant la mort lente d'une étoile. En fin de vie, une étoile a consommé l'essentiel de son carburant hydrogène. La libération d'énergie connaît donc une brusque décrue, si bien que le cœur de l'étoile se contracte tandis que l'enveloppe, au contraire, se dilate et finit par se diluer dans le milieu interstellaire. Cette belle bulle de gaz coloré fut l'atmosphère d'une étoile normale, comme le Soleil, et le point brillant central fut le réacteur nucléaire qui produisait l'énergie et qui, peu à peu, est progressivement en train de s'éteindre. Tel est le sort qui attend notre Soleil dans 5 milliards d'années. Soyez donc rassurés, ce n'est pas pour demain.

Il existe des morts d'étoiles plus spectaculaires que l'on appelle des explosions de supernova. C'est une mort cataclysmique parce que l'étoile est beaucoup plus massive et elle a pu atteindre des températures centrales suffisamment élevées pour fabriquer tous les éléments chimiques de la nature ; en fin de vie, elle subit une explosion gigantesque qui déchiquette violemment son atmosphère, telle une bombe thermonucléaire géante qui libère des énergies phénoménales. Voici l'image d'une supernova qui a été observée pour la première fois en l'an 1054, et que l'on perçoit encore mille ans plus tard (voir [cahier 2, figure 13](#)).

Je vais maintenant vous présenter un autre paysage de lumière, mais à une échelle tout à fait différente : sortons du monde des étoiles et de notre galaxie pour nous intéresser aux galaxies lointaines. L'Univers est peuplé de milliards de galaxies, immenses tourbillons contenant chacun des centaines de milliards d'étoiles. Parfois, les galaxies ont le bon goût de se frôler, de rentrer en collision et ce cliché magnifique (voir [cahier 2, figure 14](#)) montre l'interpénétration de deux galaxies spirales en train de fusionner lentement sur des échelles de temps de 100 millions d'années.

Toujours pour nous rapprocher de la dualité ombre et lumière, passons à un autre cliché qui montre, vu à travers un très grand télescope, le noir du ciel piqueté d'une myriade de grains de lumière qui sont des galaxies lointaines (voir [cahier 2, figure 15](#)). C'est à cette échelle immense de distances qu'il faut prendre conscience combien la vitesse de la lumière n'est qu'une vitesse d'escargot. Certes, vous le savez, la lumière se propage à 300 000 kilomètres par seconde, donc en une année elle parcourt ce que l'on appelle l'année-lumière : 10 000 milliards de kilomètres. Ce qui paraît grand à notre échelle est

extrêmement petit à l'échelle cosmique. Par conséquent, dès que l'on braque de grands télescopes sur l'espace lointain, on plonge également dans le passé de l'Univers. Les étoiles qui sont distantes de 50 années-lumière sont vues telles qu'elles étaient quand elles ont émis leur lumière, il y a cinquante ans. La différence n'est pas grande au regard du temps de vie des étoiles, et on peut se dire que, entre-temps, l'étoile est restée la même. Cette galaxie qui se trouve à 50 millions d'années-lumière est vue telle qu'elle était il y a 50 millions d'années. À cette époque il n'y avait aucun être humain sur Terre, mais pour la galaxie, dont la stabilité est très grande, on peut dire encore qu'elle n'a pas beaucoup changé entre-temps. En revanche, toujours sur le même cliché qui est une sorte de compression de tranches temporelles différentes, un tout petit grain de lumière représente une galaxie très lointaine, disons à 10 milliards d'années-lumière. Là, vous plongez réellement dans un passé extrêmement lointain, où non seulement la Terre (qui n'existait même pas), mais l'Univers entier lui-même, étaient très différents d'aujourd'hui. Le décalage entre l'époque d'émission de la lumière et l'époque de sa réception (aujourd'hui) devient énorme. Les galaxies que l'on voit à cette époque-là étaient des galaxies très jeunes, qui venaient à peine de se former. Elles n'avaient pas les mêmes caractéristiques que celles d'aujourd'hui. Ce couplage entre l'espace et le temps, entre la géographie et l'histoire de l'Univers, est dû à la vitesse finie de la lumière.

Une question que l'on a envie de poser est évidemment : « Mais alors quelles sont les limites de l'espace, jusqu'où peut-on observer ? » En construisant des télescopes de plus en plus puissants, qu'est-ce qu'on va voir « au-delà » ? Forcément, nous verrons des astres qui se sont formés dans l'Univers et ont émis pour la première fois leur lumière. Pour mieux comprendre cela, il faut se placer dans le cadre de la fameuse théorie du Big Bang. C'est l'une des plus grandes découvertes scientifiques de tous les temps, qui nous permet de retracer l'histoire quasi complète de l'Univers, depuis le Big Bang – un événement singulier qui aurait engendré l'espace, le temps, la matière et la lumière voici 14 milliards d'années – jusqu'à aujourd'hui.

Dans la version moderne des modèles de Big Bang (lesquels ont été inventés dans les années 1930 par le savant belge Georges Lemaître), on trouve une réponse sur l'origine de la lumière. Je ne vous parle plus de la lumière du Soleil, mais de l'origine même de toute lumière dans l'Univers, l'équivalent de la séparation de la lumière et des ténèbres. La version scientifique moderne de ce *Fiat lux* est la suivante. Durant ses 380 000 premières années d'existence à partir du Big Bang, l'Univers était opaque et n'émettait pas de lumière. Pourquoi ? Paradoxalement – et on s'approche là de plus en plus de la dualité ombre et lumière – l'Univers était opaque parce qu'il était

d'une certaine façon bourré de lumière. À cette époque, l'Univers n'avait pas formé d'étoiles, de planètes ou de galaxies. Il était composé d'un plasma, un gaz ultrachaud et ultra-dense formé de particules élémentaires et de photons (les grains de lumière). Mais les particules élémentaires étaient si serrées que la lumière restait prisonnière des particules. L'Univers était donc opaque. Mais comme il se dilate depuis le Big Bang, il est arrivé un certain moment où il est devenu transparent. La transition entre l'opacité et la transparence est précisément l'origine de toute lumière, qui remonte donc à ces premières 380 000 années. Par rapport à nous, cela correspond à 13,7 milliards d'années dans notre passé.

Maintenant, je vais commenter plus en détail l'image de cette première lumière émise par l'Univers. Nous en avons des images télescopiques dans le domaine des micro-ondes. On l'appelle le rayonnement fossile (voir [cahier 1, figure 6](#)). Cette lumière originelle s'est propagée dans l'espace et dans le temps, et nous parvient aujourd'hui refroidie par rapport à sa température d'origine. Malgré tout, elle a conservé ses caractéristiques structurelles, de sorte que le paysage cosmique que vous voyez là est l'image électromagnétique la plus ancienne que l'on puisse avoir de l'Univers. On aura beau fabriquer des instruments plus perfectionnés, on n'observera jamais plus loin que cette image-là, qui a été obtenue en 2003 par un satellite de la NASA nommé WMAP. *A priori*, elle ne paie pas de mine. Ce n'est pas un paysage cosmique aussi beau que celui des nébuleuses gazeuses colorées dont je vous ai parlé tout à l'heure, mais c'est une image plus forte. Je vais vous expliquer pourquoi il s'agit de l'une des images les plus importantes de toute l'histoire de l'astronomie.

On a codé par des couleurs les très légers changements de température du rayonnement fossile d'une région à l'autre du ciel. Une des premières choses intéressantes que l'on apprend, c'est que les grains de lumière sont aussi des grumeaux de densité dans le plasma primitif extrêmement homogène et lisse qui baignait alors l'Univers. L'écart le plus important entre le point le plus chaud et le point le plus froid, disons un grumeau rouge et un grumeau bleu du cliché, n'est que de un cent millième de degré. Le télescope utilisé pour construire cette image est en fait une sorte de thermomètre ultrasensible capable de mesurer les infimes variations de la température du fond de l'Univers. Cette carte devient fascinante quand on réalise que ces infimes grains de lumière expliquent la totalité de la matière visible aujourd'hui. Car, si je vous ai montré tout à l'heure des embryons d'étoiles, je vous montre là les embryons de toutes les structures astronomiques qui existent maintenant dans l'Univers : planètes, étoiles, galaxies, amas de galaxies, tout est né à partir de ces grumeaux infinitésimaux. Si en effet vous suivez l'évolution d'un

grumeau typique au cours du temps, disons sur 200 millions d'années, vous voyez que ce grumeau initialement infinitésimal s'est condensé et a donné naissance aux premières grandes structures matérielles de l'Univers – ces énormes condensations de matière que sont les étoiles, les galaxies, les amas de galaxies.

Voilà donc un joli décodage du rayonnement fossile, mais ce n'est pas tout. Le décodage le plus intéressant ressemble à un déchiffrement musical. En effet, l'univers primitif a vibré, sous l'impulsion initiale du Big Bang, en produisant de véritables ondes acoustiques. Au bout de 380 000 ans, ces ondes acoustiques se sont figées sous forme de grains de matière lumineuse, un peu à la façon dont se figeraient des grains de sable répartis sur la membrane d'un tambour que vous faites vibrer. Sur la carte de WMAP, vous voyez l'équivalent des grains de sable sur le tambour cosmique. De la même façon que l'on peut décoder les propriétés d'un tambour en analysant ses harmoniques fondamentales, c'est-à-dire la façon dont les grains de sable s'organisent entre eux – la taille typique des grumeaux, leurs corrélations, etc. –, on peut décoder les propriétés de l'Univers. Pour reprendre l'analogie du tambour, il est facile de comprendre que la façon dont s'organisent les grains de sable dépend d'un certain nombre de facteurs. Par exemple, de la façon dont vous frappez le tambour. Il est évident que si vous prenez une grosse masse et que vous frappez au centre, la membrane ne vibrera pas de la même façon que si vous prenez un archet de violon et que vous la faites vibrer tout doucement sur son bord. Vous avez donc une information sur la nature de l'ébranlement initial. Cela dépend également de la nature même du tambour, de sa constitution matérielle. Si vous tendez une peau animale, ou si vous utilisez du plastique, ou une plaque de métal, le matériau réagit différemment. Pour l'Univers, nous saurons de quoi il est fait en décodant les harmoniques du rayonnement fossile. On a ensuite une information sur la géométrie du tambour, selon qu'il est parfaitement plan – on appelle cela la géométrie euclidienne –, légèrement bombé – une géométrie sphérique – ou légèrement incurvé – une géométrie hyperbolique. Enfin, nous aurons une information sur la forme globale du tambour : selon qu'il est rond, carré, pentagonal, etc., les ondes ne se réfléchissent pas de la même façon sur ses bords et ne se recombinent pas de la même façon. C'est pareil pour l'espace. Même si l'Univers n'a pas de bords comme un tambour, il possède quand même certaines conditions aux limites que l'on appelle propriétés topologiques. En analysant les harmoniques du rayonnement fossile on peut ainsi obtenir des informations sur la forme globale de l'espace et sur sa taille – par exemple, savoir s'il est fini ou infini.

C'est précisément cette analyse harmonique qui a été faite depuis un peu plus d'un an maintenant, grâce à cette carte du rayonnement

fossile obtenue par WMAP. Voici les paramètres de l'Univers qui gouvernent l'histoire de notre univers, issus du déchiffrement de cette symphonie de lumière. L'âge de l'Univers est de 13,7 milliards d'années. La séparation de la lumière et de la matière a eu lieu 380 000 ans plus tard, et les premières étoiles se sont formées au bout de 200 millions d'années. Cela pour la question temporelle. Maintenant, de quoi est fait le tambour cosmique, de quoi est fait l'Univers ? Là, on s'aperçoit que toute cette profusion de galaxies, 100 milliards pense-t-on dans l'univers observable, ne représente qu'une tête d'épingle dans ce qui peuple réellement l'espace. Seulement 0,3 %, trois millièmes entendez-vous, constituent l'Univers sous forme visible ! Quand je dis visible, je ne parle même pas de la visibilité de notre œil, mais de tous les rayonnements électromagnétiques confondus, comptabilisant les rayons X, les ondes radio, tout ce que peuvent ou pourront capter un jour nos télescopes de toutes natures ! Cela implique que plus de 99 % de la matière et de l'énergie dans l'Univers sont invisibles. Mais cela ne veut pas dire pour autant que cette matière sombre est inconnue et que nous n'avons en fait rien compris encore à la nature de l'Univers. On peut en effet décoder le « noir » et savoir de quoi est faite la matière sombre. À peu près un quart est constitué de particules matérielles, qui engendrent de la gravité et ont donc tendance à freiner l'expansion de l'Univers, parce que la gravité est attractive. Cette matière sombre se répartit en trous noirs, en petites étoiles qui ne sont pas assez massives pour briller, en grands nuages d'hydrogène froids, et surtout en particules élémentaires comme des neutrinos, etc. Le reste de l'Univers, soit les trois quarts, est de l'énergie à l'état pur, qui n'est même pas sous forme de particules. C'est une énergie diffuse qui emplit en quelque sorte le tissu même de l'espace, et que les physiciens d'aujourd'hui étudient avec beaucoup d'intérêt sur le plan théorique ; en effet, beaucoup considèrent qu'il s'agit tout simplement de l'énergie du vide !

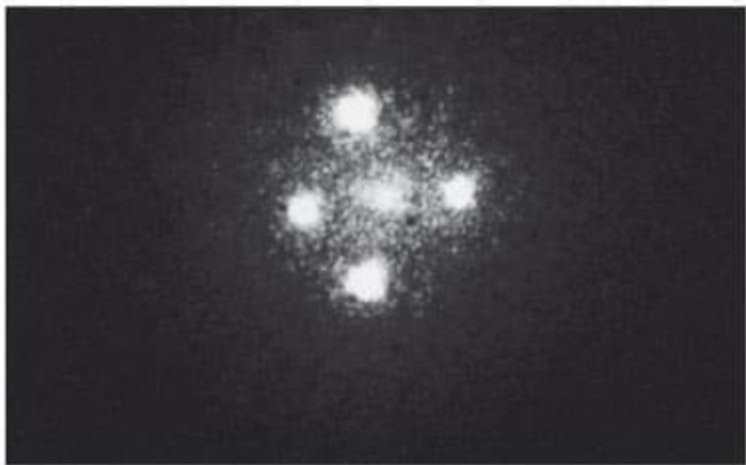
Il ne s'agit pas du vide de la physique classique, mais du vide quantique, qui est virtuellement plein d'énergie. C'est elle qui dominerait l'histoire de l'Univers. Le vide quantique est une sorte de dynamite de l'espace, qui a tendance à le faire se dilater en chacun de ses points. Cela a une conséquence fondamentale sur le futur de l'Univers. Depuis que les modèles de cosmologie relativistes existent, le questionnement sur le futur de l'Univers portait sur deux possibilités : ou bien l'expansion actuelle de l'Univers s'arrêtera un jour et s'inversera pour donner lieu à une fin de l'Univers que l'on a appelée Big Crunch, le grand écrasement final, ou bien l'expansion de l'Univers sera perpétuelle. À cause de la prépondérance de cette énergie noire, la bonne réponse semble être la deuxième : non

seulement l'expansion ne s'arrêtera jamais, mais en plus elle s'accélère au cours du temps. D'autres mesures astronomiques confirment l'accélération de l'expansion cosmique.

Quand on pense à la lumière, on pense souvent à ses jeux et aux illusions d'optique qu'elle engendre. Il y a aussi des illusions d'optique dans l'Univers. Il existe par exemple des mirages gravitationnels. La situation est la suivante : nous, observateurs terrestres, voulons observer un astre A très lointain, mais sur la ligne de visée de cet astre, il y a un objet intermédiaire, une galaxie par exemple. La théorie de la relativité générale d'Einstein nous apprend qu'un objet massif courbe l'espace dans son voisinage. Les rayons lumineux épousant la courbure de l'espace, ils peuvent emprunter plusieurs chemins pour nous parvenir. Depuis la Terre, on a l'illusion que l'astre A se trouve démultiplié en plusieurs images. C'est un mirage.

Dans ce mirage gravitationnel particulier que je vous montre, appelé « croix d'Einstein », la galaxie qui est sur la ligne de visée se trouve au centre et les quatre extrémités de la croix – qui ressemblent également aux pétales d'un trèfle à quatre feuilles – sont quatre images de la même galaxie, qui est visible en quatre positions différentes à cause du mirage, alors qu'en réalité, elle est située à l'arrière-plan. Ce type de mirage gravitationnel nous renseigne en particulier sur la quantité de matière sombre qui se trouve dans la galaxie visible. Pour que l'on ait ce mirage gravitationnel, il faut que la galaxie intermédiaire soit dix fois plus massive que sa partie visible, donc qu'elle soit essentiellement constituée de matière sombre.

Une autre question que l'on peut se poser, et c'est justement celle que je me suis posée il y a un peu plus d'une dizaine d'années dans le cadre de mon travail de chercheur, est la suivante : quand on analyse un cliché astronomique contenant une profusion de galaxies, qu'est-ce qui nous garantit qu'il ne s'agit que d'images originales ? Pourquoi n'y aurait-il pas des mirages globaux, dits mirages topologiques, qui démultiplieraient toutes les images en raison d'une forme de l'espace très complexe ? Ces « espaces chiffonnés », comme je les ai appelés, nous donneraient l'illusion que l'univers observé, tissé par les rayons lumineux, est plus vaste que l'espace réel, alors qu'en général on pense à l'inverse. Ce serait un peu l'équivalent des constructions de l'artiste-architecte Serge Salat, qui conçoit de spectaculaires installations dites d'« hyperlumière » (voir [cahier 2](#), [figure 16](#)). Il utilise des jeux de miroirs, des rayons de lumière et des faisceaux laser pour construire, à partir de petites pièces tapissées de miroirs, l'impression d'une infinie duplication de cette pièce.



Croix d'Einstein.

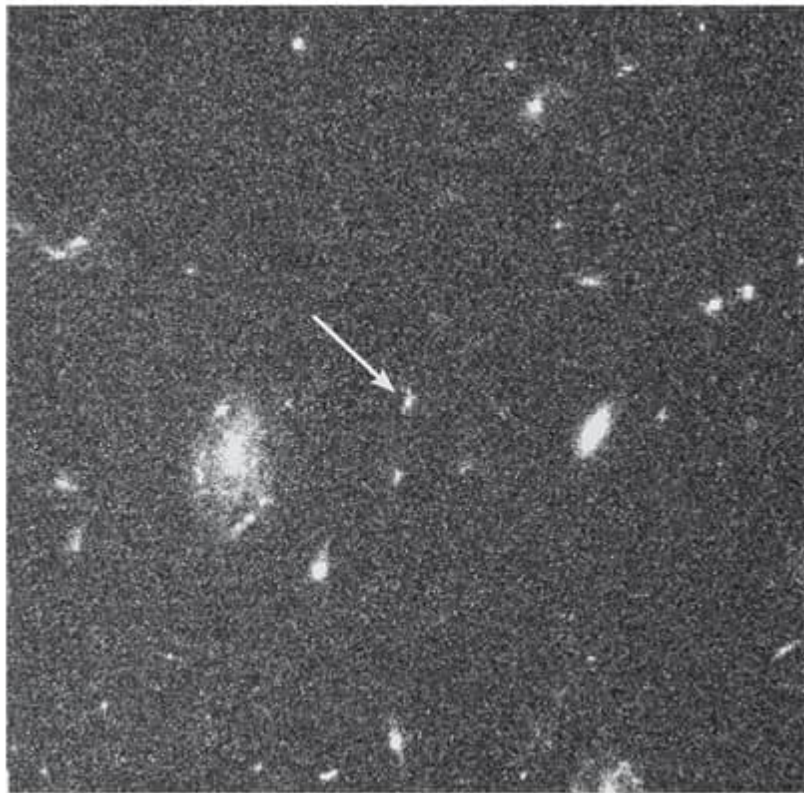
On peut construire des modèles d'univers extrêmement complexes de cette sorte ; ce ne sont évidemment pas des modèles d'espaces bornés par des parois réfléchissantes, mais disons que la forme de ces espaces produirait le même type d'effet. Voilà par exemple l'architecture invisible d'un univers où l'espace réel ne correspond qu'à la grande cellule centrale qui a la forme de ce que l'on a appelé un dodécaèdre, mais un dodécaèdre très particulier qui serait reconnecté sur lui-même, comme « chiffonné ». Si nous vivions dans un tel dodécaèdre, nous aurions l'illusion de vivre dans un espace plus vaste, une sorte de mosaïque tapissée de 120 dodécaèdres empilés les uns sur les autres. De façon assez curieuse, l'analyse harmonique du rayonnement fossile dont je vous ai parlé tout à l'heure semble confirmer depuis quelques mois une structure de cette nature pour notre Univers réel ; celui-ci serait donc un espace en expansion mais fini, replié sur lui-même et légèrement plus petit que l'espace observé, engendrant de ce fait des illusions d'optique que l'on peut calculer très précisément.

Un autre de mes sujets de prédilection, que j'ai commencé à étudier bien avant les univers chiffonnés, ce sont les fameux trous noirs. On ne peut pas parler de la dualité *ombre et lumière* dans l'Univers sans évoquer les trous noirs. L'astrophysique nous apprend que, lorsqu'une très grosse étoile, parvenue en fin de vie, a épuisé son carburant nucléaire, son cœur s'effondre sur lui-même. Et si la masse de l'étoile dépasse une certaine valeur critique, son cœur s'effondre pour donner naissance au phénomène le plus extravagant de l'astrophysique, un trou noir. C'est une concentration de matière telle qu'elle creuse une sorte de puits dans le tissu élastique de l'espace-temps et, au fond de ce puits vont se déverser sans fin la matière et la

lumière.

J'ai tout de suite été fasciné, lorsque je faisais mes études de mathématiques à la fin des années 1970, par ces objets quelque peu fantasmatiques, qui semblaient sortir de l'imagination des théoriciens mais que les télescopes ne pouvaient voir.

Le trou noir est, par sa définition même, le parangon de l'invisibilité, mais il faut savoir que la formation du trou noir s'accompagne de la plus grande libération d'énergie et de lumière que l'on puisse imaginer dans l'Univers – hormis le Big Bang bien sûr. Nous avons des images récemment captées de la formation d'un trou noir à travers une explosion d'étoile que l'on appelle une hypernova. Cette hypernova se situe à 10 milliards d'années-lumière de nous. Or que voyons-nous sur ce cliché ? Deux taches aussi lumineuses l'une que l'autre. La première est cette hypernova, grosse étoile qui explose et se transforme en trou noir, tandis que l'autre est une galaxie constituée de 200 milliards d'étoiles. En outre, l'image de la galaxie reste sur le cliché, tandis que l'hypernova s'allume et s'éteint en moins d'une seconde. Cela signifie que, pendant ce temps très court, l'hypernova qui explose et forme un trou noir émet l'équivalent de l'énergie de 200 milliards d'étoiles ! Vous voyez comment la formation d'un trou noir peut s'accompagner de la plus grande libération de lumière que l'on puisse imaginer.



Hypernova.

Une fois que les trous noirs sont formés, dans certains cas, les astrophysiciens parviennent également à détecter leur présence, mais indirectement. Un trou noir n'est pas forcément « célibataire », isolé dans l'espace ; il peut vivre par exemple dans un couple d'étoiles et dans ce cas-là, le trou noir aspire progressivement le gaz de l'étoile compagne. Ce gaz s'enroule en une sorte de tourbillon autour du trou noir et, avant de disparaître définitivement, il émet des rayonnements caractéristiques qui sont captés par nos télescopes.

Moi qui ai toujours été fasciné par la dualité ombre et lumière, j'ai voulu que l'un de mes premiers travaux astronomiques, signé d'un nom que l'on croyait être un pseudonyme, comme je vous le disais tout à l'heure, soit consacré à la visualisation, par ordinateur, de l'image d'un trou noir entouré d'un disque de gaz brillant, en tenant compte des déformations de l'espace, du temps et des rayons lumineux. Voici l'image que j'ai publiée en 1979 (voir illustration p. 349). Ultérieurement, j'ai découvert la meilleure légende qui se puisse trouver à cette image. Ce n'est pas un commentaire scientifique, mais six vers extraits d'un poème de Gérard de Nerval – poète du noir

et de la lumière par excellence : « En cherchant l'œil de Dieu, je n'ai vu qu'un orbite / Vaste, noir et sans fond, d'où la nuit qui l'habite / Rayonne sur le monde et s'épaissit toujours. / Un arc-en-ciel étrange entoure ce puits sombre, / Seuil de l'ancien chaos dont le néant est l'ombre, / Spirale engloutissant les mondes et les jours. » Cette rencontre inattendue entre science et poésie illustre bien comment la dualité des rapports entre l'ombre et la lumière fait partie de notre métaphysique intérieure. Il y a eu depuis des simulations numériques plus élaborées, en couleurs et animées, représentant les jeux et déformations de la lumière engendrées par le noir du trou.

Je vais vous présenter brièvement un autre de mes travaux d'astrophysicien, tournant toujours autour de la problématique de l'ombre et de la lumière. Il y a une vingtaine d'années, je me suis intéressé à la façon dont un trou noir géant (on pense qu'il existe de gigantesques trous noirs au centre de pratiquement toutes les galaxies) pouvait tout simplement briser une étoile. En effet, une étoile qui frôle le trou noir, un peu à la façon dont les comètes frôlent le Soleil, passe dans une zone critique au voisinage du trou noir, à l'intérieur de laquelle les forces de marée engendrées par le trou noir sont capables de la déchirer. À cette époque, mes collaborateurs et moi avons fait des calculs purement théoriques, mettant tout cela en équations et les résolvant par ordinateur, et il n'y avait aucun télescope capable de voir ce phénomène. Or nous avons découvert que l'étoile, en s'approchant du trou noir, devait être aplatie sous forme d'une crêpe, et à force d'être aplatie, elle était chauffée, comprimée et la crêpe finissait par « sauter ». Je me souviens avoir baptisé le phénomène « crêpe stellaire flambée » (voir [cahier 2](#), [figure 17](#)). Après cette prédiction, j'ai changé de sujet, mais j'ai eu le plaisir d'apprendre que depuis quelques années, la nouvelle génération de télescopes commence à détecter ce genre de phénomènes dans les noyaux de galaxies lointaines. L'année dernière, il y a eu un tel événement dont la NASA a fait un petit film, qui n'est qu'une visualisation assez naïve d'une crêpe stellaire flambée mais que je vous montre quand même. Vous voyez ici un très gros trou noir, qui fait peut-être 100 millions de fois la masse du Soleil, et voici que surgit une petite étoile, elle entre dans la zone critique et finit par être écrasée et explose sous la forme d'une crêpe stellaire flambée.

J'en ai fini avec mon exposé proprement dit et je suis prêt à répondre à quelques questions.

Intervenant : Il y a une chose qui m'a étonné, c'est que de la naissance à la mort des étoiles, elles sont toujours rondes.

J.-P. L. : Vous avez vu, en fait, que la forme d'une étoile change au cours de son existence. Je vous ai montré d'abord des embryons

d'étoiles qui n'étaient pas ronds parce qu'ils n'étaient pas autonomes. Une étoile ne devient ronde que lorsqu'elle devient entièrement gouvernée par sa propre gravité. La gravité attire les particules vers le centre de la même façon dans toutes les directions, donc les corps qui sont soumis à leur propre gravité ont tendance à s'arrondir. Toutefois, les corps sphériques tournent sur eux-mêmes, et vous savez qu'ils ont tendance à s'aplatir légèrement. La Terre, par exemple, est légèrement aplatie aux pôles, le Soleil est lui aussi légèrement aplati, et il existe des étoiles qui tournent très vite et qui, de ce fait, sont très aplaties. Lors de la fin explosive d'une étoile, comme une supernova, d'autres phénomènes entrent en jeu et les gaz sont éparpillés de façon non sphérique.

Intervenant : Est-ce que les trous noirs, s'ils existent, représentent un danger ?

J.-P. L. : Après que les trous noirs eurent été conçus par les théoriciens et qu'ils eurent laissé sceptiques la plupart des astronomes, nous avons acquis les moyens de les détecter, même si c'est de façon indirecte. On commence donc à avoir aujourd'hui d'assez bonnes idées sur le nombre de trous noirs dans l'Univers. Ils se forment dans des conditions exceptionnelles, il faut de très grosses étoiles, et celles-ci sont rares. Malgré tout, il y a tellement d'étoiles dans l'Univers que l'on estime que, dans une galaxie typique comme la nôtre, la Voie lactée, sur les 200 milliards d'étoiles environ qu'elle contient, il doit y en avoir entre 10 et 100 millions qui se sont transformées en trous noirs. C'est très peu finalement. Cela implique que le plus proche trou noir est, en toute probabilité, extrêmement loin de nous – plusieurs milliers d'années-lumière. Si cela peut vous rassurer, aucun trou noir ne va donc passer près de notre planète et menacer de l'absorber. Le sort de la Terre n'est absolument pas lié à un trou noir. Si on en plaçait un au lieu du Soleil, ayant la même masse que lui, on ne se rendrait compte de rien, hormis le fait qu'il n'y aurait plus de lumière : sur le plan gravitationnel, la Terre continuerait à tourner sur son orbite elliptique autour du trou noir sans être absorbée. Il faut vraiment être tout près d'un trou noir pour en ressentir les effets.

Intervenant : Est-ce qu'il existe ou est-ce que l'on peut concevoir des expériences, à l'échelle humaine, qui simulent tout ou partie de ces phénomènes, avec les accélérateurs, synchrotrons et autres instruments de ce genre ?

J.-P. L. : Il y a plusieurs types d'expériences que l'on peut faire en astrophysique. Cette science a un statut particulier par rapport aux autres sciences de la matière, qui offrent, elles, la possibilité d'expérimenter en laboratoire. Vous voulez étudier par exemple un cristal ? Eh bien, vous le placez dans votre labo, vous le faites chauffer, vous l'irradiez, vous tapez dessus, bref vous voyez comment

il réagit. Avec les étoiles, vous ne pouvez pas le faire. Vous recevez passivement leur lumière. On peut malgré tout faire des expériences numériques, que l'on appelle des simulations. Prenez une explosion de supernova, par exemple. On écrit les équations qui gouvernent son évolution, on fait tourner l'ordinateur puis on regarde le résultat. Si celui-ci correspond à ce qui a été observé, on a fait une bonne simulation, sinon on modifie les paramètres jusqu'à ce qu'on ait trouvé la bonne modélisation. La simulation numérique est donc une forme d'expérience sensible. Une autre forme d'expérience, qui concerne plutôt la physique des très hautes énergies, concerne la description des premiers instants de l'Univers peu après le Big Bang. Vous avez tous entendu parler du CERN, à Genève, avec ses grands collisionneurs qui sont capables d'accélérer les particules élémentaires à des vitesses proches de celle de la lumière et leur confèrent des énergies phénoménales. Lorsque l'on fait entrer en collision des faisceaux de particules ainsi accélérées, on recrée pendant quelques fractions de seconde des conditions de température et d'énergie extrêmes, un million de milliards de degrés par exemple, qui sont celles que l'univers primordial a dû connaître juste après le Big Bang. Avec ces expériences, on peut donc tester et reconstituer les propriétés de l'Univers lorsqu'il n'était âgé que d'un dix milliardième de seconde.

Intervenante : Ce qui m'a paru fascinant, au-delà même de tout ce que vous avez évoqué, c'est peut-être le bruit assourdissant qu'il devrait y avoir dans cet univers et qu'on n'entend pas du tout.

J.-P. L. : C'est un bruit de lumière. Le bruit est assourdissant mais il n'est pas perceptible à nos oreilles, parce que ce que l'on appelle le son, en général, a besoin d'un milieu suffisamment dense pour se propager. Si vous m'entendez parler dans cette salle, c'est parce qu'il y a de l'air autour de nous. Mes cordes vocales font vibrer l'air et vous transmettent les informations sous forme d'ondes de compression qui viennent frapper vos tympanes. Si on se trouvait dans le vide interstellaire, vous ne m'entendriez pas parce que les vibrations que j'émettrais ne pourraient pas se propager.

Malgré tout, il y a une sorte de symphonie de l'Univers. C'est une symphonie de lumière, une sorte de partition que l'on apprend à déchiffrer. Les ondes lumineuses ne sont pas des ondes sonores, mais elles sont aussi caractérisées par une longueur d'onde et une fréquence, de sorte que l'on peut faire des analogies entre la lumière et le son. Prenez une étoile comme le Soleil. Vous ne l'entendez pas, mais vous le voyez vibrer, parce que le Soleil est une grosse boule de gaz agitée de mouvements internes ascendants et descendants. Sa surface est comme la membrane d'un tambour compliqué qui vibre, et on dispose aujourd'hui des télescopes capables de faire la carte des régions du Soleil qui montent et celles qui descendent (quelques

centimètres par seconde à peine). On reconstitue ainsi la partition du Soleil, qui est aussi une partition de lumière, à travers laquelle on déduit les conditions qui règnent à l'intérieur de lui.

Intervenant : Sans effleurer le sujet de demain sur la pollution visuelle, je voudrais avoir votre appréciation sur ce phénomène que l'on appelle pollution du ciel, par la lumière qu'émettent les habitants de la Terre, qui paraît complètement dérisoire par rapport aux immenses phénomènes astronomiques dont vous parlez mais qui, pourtant, alerte un certain nombre de gens.

J.-P. L. : Effectivement, l'éclairage urbain et la pollution lumineuse causent de grands problèmes pour l'observation astronomique. Je vous ai montré des phénomènes astronomiques qui émettent des débauches d'énergie, mais ils se produisent extrêmement loin dans l'espace, et nous ne recueillons sur Terre que l'écume de cette énergie. Nous ne recevons que quelques photons, et il faut des sites d'observation exceptionnels pour parvenir à prendre les magnifiques clichés que je vous ai montrés. Au cours de l'histoire de l'astronomie, les lieux d'observation se sont progressivement éloignés des villes. Lorsque Galilée a utilisé pour la première fois une lunette et l'a braquée vers le ciel pour découvrir les satellites de Jupiter ou les phases de Vénus, il se trouvait dans la ville de Venise, mais à cette époque les lumières n'étaient pas gênantes. Par la suite, les grands observatoires ont commencé à se développer près des grandes villes comme Paris, Londres ou Saint-Pétersbourg. Les choses ont commencé à changer radicalement avec le premier éclairage automatique des villes au gaz, dans la seconde moitié du XIX^e siècle. La pollution lumineuse a commencé à devenir un problème et les observatoires ont commencé à s'éloigner. Avec l'apparition de l'électricité au début du XX^e siècle, la situation est devenue de plus en plus problématique. Dans un pays comme la France, les observatoires de Meudon et de Paris ont gardé leur nom d'observatoire, mais ne servent plus de lieu d'observation depuis de nombreuses années. Ce sont des instituts de recherche avec des bureaux, où des théoriciens comme moi travaillent sur des ordinateurs. Les astronomes observateurs, il y a encore vingt ans, pouvaient se rendre dans deux sites privilégiés du sud de la France, l'un à Saint-Michel-de-Provence, au-dessus de Forcalquier, l'autre au pic du Midi dans les Pyrénées. Aujourd'hui, même ces sites ne sont plus assez performants. On peut encore y faire quelques observations astronomiques planétaires, mais pour observer le ciel très profond et des astres très faibles, il faut aller dans la cordillère des Andes, au Chili, ou au sommet du Mauna Kea aux îles Hawaïi, à 4 200 mètres d'altitude. Il y a là une armada de télescopes de tous les pays, parce que ces sites sont vraiment exceptionnels. Même le télescope géant du mont Palomar aux États-Unis, dont on a beaucoup parlé

entre les années 1930 et 1990, est aujourd'hui en voie de fermeture. Quand on l'a construit, les astronomes voulaient déjà se mettre à l'abri de la pollution lumineuse de Los Angeles, et ils ont cru aller suffisamment loin en l'installant sur une montagne à 150 kilomètres du cœur de Los Angeles, près de Pasadena. Aujourd'hui, cette mégapole arrive au pied du mont Palomar, et on ne peut plus y faire d'observations profondes ! Les sites très reculés s'amenuisent sur Terre, si bien qu'un jour on finira par installer nos télescopes sur la face cachée de la Lune, où on sera tranquille pendant un bon bout de temps.

Ces problèmes concernent l'astronomie professionnelle. Les astronomes amateurs – et il y en a beaucoup en France, répartis dans des clubs – ont, eux, des moyens très réduits et ne peuvent pas aller au Chili ou à Hawaï. Ils ont leur petit télescope pour faire leurs observations dans leur jardin ou bien ils prennent leur voiture et vont à dix kilomètres dans la campagne. Cette solution ne suffit plus. C'est pour cette raison que beaucoup d'astronomes amateurs et d'associations réclament, auprès des pouvoirs publics, de faire très attention à l'éclairage urbain agressif, qui gâche ce plaisir extraordinaire de voir le ciel, même en amateur.

Intervenant : Pour l'astrophysicien que vous êtes, la question bien connue : « le monde est-il fini ou infini ? » a-t-elle encore un sens ?

J.-P. L. : C'est un vieux débat, et il se trouve que cette interrogation a plus que jamais un sens, d'autant que je pense avoir moi-même apporté quelques pierres au sujet avec les modèles d'espace chiffonné que j'ai brièvement mentionnés. Je répète qu'en analysant les vibrations du « tambour cosmique », décodées à travers la partition de lumière du rayonnement fossile observée en 2003, mes collaborateurs et moi-même avons interprété un certain « manque de graves » dans les harmoniques de l'Univers par la finitude de l'espace. On a pu ainsi attribuer une taille et une forme très précise à l'Univers, celle du dodécaèdre en expansion dont je vous ai parlé. La question est donc extrêmement pertinente et plus que jamais d'actualité.

Intervenant : Pour suivre ces questions un peu naïves, est-ce qu'il y a bien une certitude ou une hypothèse sur le temps ? L'espace serait limité, mais, avant le Big Bang ? C'est une question d'enfant !

J.-P. L. : Il n'y a plus d'âge pour poser de telles questions ! La question de l'enfant n'est pas plus naïve que la question de l'adulte. D'abord, je suis désolé de contredire votre commentaire. Ce n'est pas parce que je vous ai dit que l'espace était fini que je vous ai dit que l'espace avait des limites. L'espace est fini mais il n'a pas de limites. Cela pose toujours un problème de visualisation parce que notre espace mental n'est pas habitué à visualiser des espaces finis mais qui n'ont pas de limites. On a pu le montrer sur le plan physiologique,

notre espace mental reconstitue un espace euclidien infini au sein duquel on visualise des formes délimitées par des surfaces. On a donc toujours tendance à visualiser un objet en le plongeant dans un espace extérieur fictif, qui n'est que notre espace mental. Et on a donc toujours tendance à attribuer une limite à la finitude d'un objet. Pour l'Univers, c'est autre chose. Tout d'abord, sur le plan du pur vocabulaire, il y a comme un défaut de logique à parler de quelque chose « à l'extérieur de l'espace ». Puisque l'espace est, par définition, l'ensemble de tous les lieux de l'Univers, comment voulez-vous parler d'un lieu qui serait hors de tout lieu ? Il ne peut pas y avoir d'espace en dehors de l'espace, le terme dehors impliquant déjà une notion de déplacement spatial ! Je vais vous donner un exemple d'espace fini, appelé hypersphère. Partons d'abord de la sphère, la surface d'un ballon par exemple. C'est une surface, donc un espace à deux dimensions. Vous êtes sur la surface de la sphère, la surface de la terre, par exemple, vous filez droit devant vous, vous accomplissez un grand cercle et vous revenez à votre point de départ. Vous voyez bien que vous êtes dans un espace bidimensionnel qui est fini – vous ne vous éloignez jamais indéfiniment – et qui n'a pas de limites – vous n'êtes jamais tombé dans un trou. Pour mieux le comprendre, essayez de visualiser un planisphère en projection polaire. C'est-à-dire que vous représentez la totalité de la surface terrestre par deux disques. L'un centré sur le pôle Nord représente l'hémisphère Nord, l'autre centré sur le pôle Sud représente l'hémisphère Sud, chacun des disques étant délimité par l'équateur. Vous avez donc deux disques pour représenter le planisphère, et il est évident que l'équateur de chacun des disques n'est pas une limite de l'espace. En réalité, les deux frontières du disque sont les mêmes points, ceux de l'équateur terrestre. Si vous partez du pôle Nord de l'un des disques, vous traversez la France, vous allez vers le sud, vous arrivez au bord apparent du disque, c'est-à-dire à l'équateur. Comme ce n'est pas un vrai bord, vous passez immédiatement sur l'équateur de l'autre disque et vous continuez vers le pôle Sud. Et ainsi de suite sans limite, vous pouvez naviguer indéfiniment dans votre carte sans jamais rencontrer de frontières. Pour l'hypersphère c'est la même chose en rajoutant la troisième dimension. Vous remplacez les deux disques par l'intérieur de sphères, et vous obtenez une représentation de l'hypersphère par deux sphères accolées, telles que la surface de chacune des sphères est collée à la surface de l'autre sphère. Dans ce volume, vous pouvez circuler indéfiniment dans un volume fini mais qui n'a ni frontière ni extérieur.

De même pour le temps : on ne peut pas parler d'un temps en dehors du temps et, dans la mesure où l'on suppose que le temps a été créé au Big Bang, la question d'un « avant Big Bang » n'a pas de sens.

Toutefois, des théories récentes forment l'hypothèse que le Big Bang n'a pas créé le temps et donc qu'il a pu exister une phase de l'Univers antérieure au Big Bang. Ces théories ne sont pour l'instant pas testables par des observations et restent très spéculatives.

Intervenant : À quoi ça sert l'astrophysique et l'astronomie en tant que science ?

J.-P. L. : Dans la mesure où l'astronomie est la plus ancienne des sciences, on peut penser que cela sert à autre chose qu'à rêver ! La naissance de l'astronomie voici cinq mille ans est liée à deux raisons principales, l'une culturelle, l'autre pratique. La première est ce qui fait notre spécificité d'être humain et que j'appellerai l'étonnement philosophique. Quand on est là, sur Terre, dans notre petite condition d'être humain limité dans l'espace et dans le temps, et que l'on contemple le ciel étoilé, comment ne pas se poser la question : « Qu'est-ce que l'on fait là-dedans ? Est-ce que ces étoiles là-haut ont une signification pour nous ? » C'est une question philosophique, métaphysique, voire religieuse chez certains, donc essentielle. La première mission de l'astronomie a justement été de tenter de décoder un éventuel rapport entre nous et ce qu'il y a là-haut. Entre le petit et le grand, le microcosme et macrocosme. Il y a eu bien sûr dans l'histoire de fausses interprétations, des superstitions et des croyances irrationnelles comme l'astrologie, où nos fantasmes se nourrissent par des sentiments cosmiques projetés, mais l'astronomie scientifique a rationalisé tout cela et y est parvenue. Le fait par exemple de comprendre que les atomes qui nous constituent ont été forgés dans le Big Bang et dans le cœur d'étoiles mortes nous révèle le vrai rapport entre l'homme et le cosmos.

La seconde raison est totalement pratique. Quand les sociétés ont eu besoin de se structurer il y a cinq mille ans, il leur a fallu définir le temps à travers des calendriers. Pour avoir des calendriers fiables, il faut des horloges. Et les seules horloges naturelles connues dans l'Antiquité étaient les mouvements réguliers des astres, de la Lune et du Soleil. Les premières civilisations importantes, en Égypte, à Babylone, en Chine, etc., ont réellement pu se développer à travers l'établissement de calendriers luni-solaires, qui ont demandé l'accumulation d'observations astronomiques faites par des professionnels, pendant des siècles et des siècles, pour mettre en évidence des cycles réguliers. Par la suite, toute une phase de l'histoire de notre civilisation occidentale, à partir de Christophe Colomb, a été marquée par l'exploration de la Terre. Comme la navigation se faisait grâce aux étoiles, l'astronomie a joué un rôle essentiel. Il fallait établir des cartes précises du ciel, tenir compte des irrégularités de la Lune, de la précession des équinoxes et nombre d'autres phénomènes célestes. Cette branche de l'astronomie dite « pratique » fut utile à la

géographie et à la navigation, donc utile à la conquête des nouvelles terres et des mers. Tout ceci a déterminé l'histoire géopolitique et économique de nos peuples. Par exemple, les rivalités pour s'emparer des colonies entre la France, l'Angleterre, la Hollande, le Portugal, etc., au siècle des Lumières, étaient conditionnées par les capacités des astronomes-géographes à calculer la latitude et la longitude et à établir de bonnes cartes.

Rien n'a changé aujourd'hui, malgré les apparences. Par exemple, la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui vous semble peut-être seulement jolie et poétique avec son espace-temps courbe, à quoi sert-elle ? Savez-vous qu'on la retrouve dans les petits boîtiers GPS qu'utilisent les camionneurs, les chauffeurs de taxi, les randonneurs, et les navigateurs ? Les GPS mesurent la position à la surface de la Terre avec une grande précision en utilisant des constellations de satellites artificiels et en faisant une triangulation cosmique, pour cela ils doivent tenir compte de la courbure de l'espace, c'est-à-dire de la relativité générale, pour calculer les temps de trajet des rayons lumineux. Sans cela, vous feriez une erreur de quelques centaines de mètres, et si vous étiez perdu en haute montagne dans la brume, vous rateriez le refuge et vous mourriez !

Intervenant : Pour l'instant, la théorie du Big Bang est là et on attend confirmation. Est-ce qu'il y a actuellement des théories différentes en cours, mis à part celle créationniste ?

J.-P. L. : Le créationnisme n'est pas une théorie scientifique. Évidemment, la théorie du Big Bang est scientifique et, comme tout modèle scientifique, c'est un modèle provisoire. La science ne délivre pas de vérité avec un grand V, elle délivre des modèles qui font office de vérité provisoire le temps que dure le modèle face aux confrontations avec l'observation et l'expérience. La théorie du Big Bang, qui a été forgé par Lemaître et Friedmann dans les années 1920-1930, puis développée et améliorée, tient extraordinairement bien la route. C'est le seul modèle scientifique de cosmologie qui soit fondé sur une théorie de physique fondamentale bien vérifiée – la relativité générale – et dont les prédictions s'accordent avec l'ensemble des observations astronomiques, et plus particulièrement les observations de 2003 sur le rayonnement fossile. Ces observations permettent vraiment pour la première fois de valider tout un ensemble de modèles. En effet, il ne faut pas croire qu'il y ait « un » modèle de Big Bang, il en existe plusieurs, en raison de plusieurs paramètres qui gouvernent les équations et qui, selon leurs valeurs, peuvent donner des solutions très différentes. Aujourd'hui, les observations sont affinées à quelques pour-cent près, et permettent d'éliminer un certain nombre de modèles tout en favorisant une solution de Big Bang à expansion perpétuelle accélérée. Bien entendu, il y a encore quelques

questions non résolues, ainsi que des théories alternatives tentant de décrire l'Univers par d'autres modèles que ceux du Big Bang. C'est normal : en science, il est nécessaire de développer des théories contradictoires. Mais pour l'instant, ces théories-là sont très loin d'avoir un statut théorique et expérimental aussi solide que celui du Big Bang.

Intervenante : Vous avez dit que le vide quantique représentait 72 % de l'Univers. Est-ce que vous pouvez au moins nous en dire quelque chose ?

J.-P. L. : Cette notion de vide quantique est effectivement une des questions non complètement résolues les plus fondamentales. La physique quantique existe depuis à peu près un siècle. Elle prédit et calcule que le vide, c'est-à-dire l'absence de particules, de champs de forces ou de rayonnements, ne se réduit pas à « rien » comme dans la physique classique, mais à un niveau d'énergie minimal qui est non nul. En cosmologie, il semblerait que cette énergie du vide gouverne l'évolution de l'Univers, puisqu'elle représenterait *grosso modo* les trois quarts de l'énergie totale, et serait actuellement responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers au cours du temps. Certains modèles de cosmologie dits quantiques font également intervenir le vide à l'origine même de l'Univers. On remplace alors la notion de point singulier d'où tout serait sorti, qui est une absurdité physique, par celle d'un vide quantique, réalité première et fondamentale, génératrice de toute chose. En effet, l'énergie du vide a tendance à fluctuer spontanément, un peu comme la surface d'un océan agité bouillonne et produit de grandes vagues. Le vide quantique fluctuerait aléatoirement, les grosses fluctuations engendreraient l'équivalent des gouttes de l'écume. Une goutte de l'écume du vide quantique se matérialisant en espace-temps-matière deviendrait un univers à part entière. Dans ce nouveau schéma, on fait exploser le cadre du Big Bang traditionnel, puisqu'on a la possibilité d'un « plurivers », c'est-à-dire une multitude d'univers différents, tous jaillis de l'écume du vide quantique à des époques différentes et dans des conditions différentes, chaque univers vivant ensuite sa propre histoire.

Intervenante : Je voudrais rebondir là-dessus, je me souviens du film *Le Trou noir* de Walt Disney, qui fait partie de l'un de mes grands films de science-fiction de la fin des années 1970, où le trou noir était conçu comme un lieu de passage, justement peut-être d'un univers à l'autre. Cette lumière et cette énergie, où vont-elles ?

J.-P. L. : Sur le plan purement cinématographique, je me permettrais de dire que le film de Walt Disney sur les trous noirs est l'un des plus calamiteux que j'aie vus. Je me souviens : l'époque où il a été projeté pour la première fois en France, à la fin des années 1970, a été l'occasion de ma première apparition publique en tant

qu'astrophysicien. J'étais alors un tout jeune chercheur. Le cinéma Gaumont, sur les Champs-Élysées, avait eu l'idée de présenter ce film en avant-première et un journaliste scientifique connu, Robert Clarke, avait invité deux astrophysiciens pour le commenter devant le public après sa projection. Il avait donc fait appel à Hubert Reeves, déjà très connu, et à un inconnu nommé Jean-Pierre Luminet, mais qui présentait l'avantage d'être l'un des rares spécialistes français du sujet. Voilà pour la petite anecdote.

Ce film utilise une idée qui n'est pas absurde, à savoir que les trous noirs pourraient être des portes de passage pour naviguer dans l'espace et le temps. Dans les équations de la relativité générale, il y a en effet la possibilité que le fond d'un trou noir ne soit pas bouché, mais qu'il pourrait être connecté à une autre région, soit de l'Univers lui-même, soit d'autres univers, grâce à des sortes de tunnels d'espace-temps appelés « trous de ver », en anglais *worm-holes*. Ceux-ci permettraient, si on pouvait les emprunter, de faire des voyages tout à fait stupéfiants dans l'espace et dans le temps en franchissant des distances phénoménales en un temps très bref, sans pour autant dépasser la vitesse de la lumière.

Ce sont des solutions qui existent dans les équations, mais on ne sait pas si elles se réalisent réellement dans l'Univers. Pour l'instant, les trous de ver sont surtout exploités par les écrivains et les cinéastes de science-fiction, parce que l'on rêve depuis longtemps d'aller visiter les étoiles et les galaxies lointaines.

Intervenant : Vous avez commencé votre intervention par un parallèle entre les découvertes astrophysiques et ce qu'en pensaient deux philosophes majeurs à l'orée de l'humanité, Platon d'un côté, et les atomistes de l'autre. J'aimerais savoir où en est le dialogue, aujourd'hui, entre l'astrophysique et la philosophie, entre la physique et la métaphysique. Est-ce que nous en sommes toujours à ce postulat, qui me vient de mémoire de Heidegger, lequel en regard des dernières découvertes scientifiques sur l'Univers, établit un constat sur la condition d'être humain voué à des horizons lointains et à une incertitude constante ? Ce que vous avez indiqué à demi-mot sur la pluralité des mondes que nous dévoile l'astrophysique d'aujourd'hui est-il une préfiguration de ce que nous disent les philosophes postmodernes sur la pratique de tous les mondes possibles ? En sommes-nous là, ou bien d'autres dialogues sont-ils possibles ? Croyez-vous que ce dialogue existe encore, ou bien est-il mis en veilleuse aujourd'hui ?

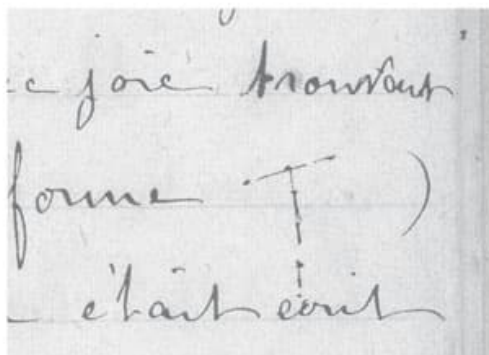
J.-P. L. : Le dialogue entre physique, astrophysique, métaphysique et philosophie est toujours extrêmement vivant. Évidemment, il a beaucoup évolué au cours des âges, dans la mesure où l'évolution de nos connaissances scientifiques a modifié certaines

options philosophiques. Je ne voudrais pas critiquer la philosophie moderne, mais je ne suis pas sûr que Heidegger ait dit des choses beaucoup plus fondamentales que les philosophes des temps passés comme Platon, Spinoza ou Kant. Il y a toujours eu deux aspects dans la recherche : un aspect théorique et un aspect fondamental. Ces deux façons de faire de la science ne sont pas du tout opposées ; elles doivent au contraire s'épauler constamment l'une l'autre, se confronter en s'enrichissant et parfois en se détruisant en un dialogue permanent. Cela nous renvoie à deux options philosophiques qui sont celles de Platon et d'Aristote. Vous connaissez sans doute la fresque de Raphaël, *L'École d'Athènes*, qui montre l'aréopage de tous les grands philosophes de l'Antiquité ayant contribué à une certaine vision du monde qui a imprégné l'Occident pendant de nombreux siècles. Au centre du tableau, on voit Platon et Aristote côte à côte, et Platon a le doigt levé vers le ciel pour bien signifier qu'il est l'idéaliste ; il croit qu'il existe des vérités transcendantes, qu'il appelle les idéaux ; Aristote, au contraire, dirige sa main à plat vers le sol, comme s'il voulait dire à Platon qu'il faut avant tout explorer la réalité matérielle en classant, en observant, en expérimentant. La physique a toujours été dans cette dualité. L'idée que l'on ne perçoit qu'une infime partie de l'Univers, et que le reste est dans un invisible que l'on essaie de décoder par des mathématiques et des théories fondamentales, renvoie au mythe de la caverne de Platon. Cette magnifique parabole de la condition humaine dont nous parle Platon dans *La République* nous dit que nous, êtres humains, sommes comme des esclaves enchaînés dans une caverne obscure. Il y a des flambeaux derrière nous mais on ne voit que les ombres qui se projettent sur la paroi, et on appelle « réalité » ces ombres. Comme Platon est un idéaliste, il pense qu'il est possible de se libérer de nos chaînes par la discipline de l'esprit, les mathématiques, la musique, la philosophie, pour accéder à la réalité du monde et atteindre les idéaux à partir des ombres. C'est ce que tente de faire la physique théorique d'aujourd'hui. À travers les ombres et les faibles lumières que nous percevons, on essaie de reconstituer, par des modèles mathématiques très sophistiqués, une réalité beaucoup plus riche et beaucoup plus complexe. D'un autre côté, il y a la démarche aristotélicienne, celle du physicien expérimentateur, qui met constamment les théories à l'épreuve de l'expérience, en élimine la plupart pour n'en laisser subsister que quelques-unes. L'avancée de la recherche scientifique a toujours été fondée sur le dialogue permanent entre ces deux visions philosophiques de la connaissance.

Orion et Thérèse¹

« Mais je reviens à ma journée du Dimanche. [...] C'était avec plaisir que je voyais Papa venir nous chercher. En revenant je regardais les étoiles qui scintillaient doucement et cette vue me ravissait... Il y avait surtout un groupe de perles d'or que je remarquais avec joie trouvant qu'il avait la forme d'un T (voici à peu près sa forme), je le faisais voir à Papa en lui disant que mon nom était écrit dans le Ciel et puis ne voulant rien voir de la vilaine terre, je lui demandais de me conduire ; alors sans regarder où je posais les pieds, je mettais ma petite tête bien en l'air, ne me lassant pas de contempler l'azur étoilé ! »

Thérèse de Lisieux,
Manuscrit A, folio 17/18.



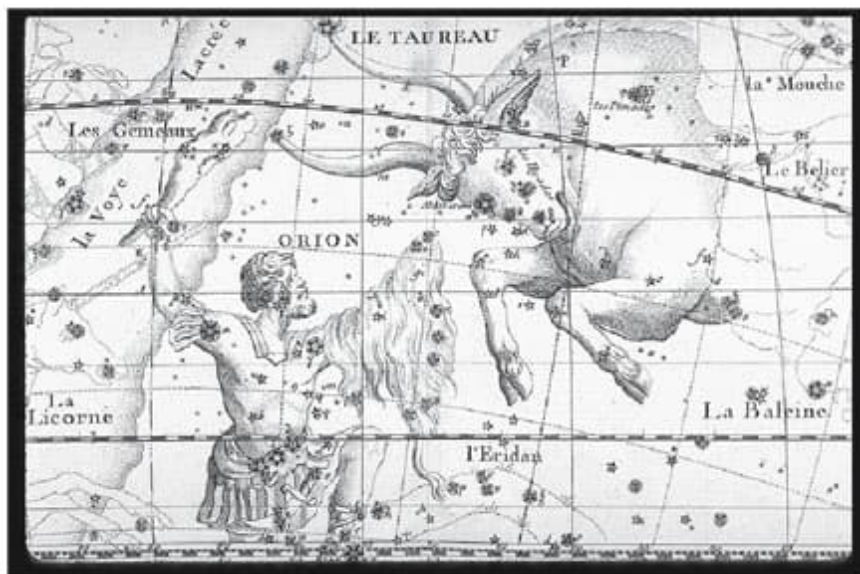
Extrait d'une lettre manuscrite de Thérèse dessinant le « T » formé par les étoiles du Baudrier (barre horizontale) et celle de l'Épée (barre verticale).



La constellation d'Orion prise par le télescope spatial Hubble (les lignes caractéristiques joignant les étoiles sont rajoutées au cliché).

Orion est pour beaucoup la plus belle constellation du ciel. Visible l'hiver sous les latitudes européennes, la figure du géant Orion se dessine par neuf étoiles principales : quatre (dont Betelgeuse et Rigel sont de première grandeur) forment un rectangle et trois sont alignées dans le Baudrier, appelées aussi les Trois Rois. Chez les

Égyptiens, Orion était identifié au dieu Osiris. Dans la mythologie grecque, le géant Orion poursuit les Pléiades, tenant de la main gauche une peau de bête ou un bouclier, brandissant de l'autre une massue ou une épée pour combattre le Taureau qui se précipite sur lui. Orion est donc un thème de choix pour les cartographes du ciel.



Le guerrier Orion combattant le Taureau
(Atlas de Fortin, 1776).

Le premier recensement scientifique connu des étoiles d'Orion figure dans *L'Almageste* de l'astronome grec d'Alexandrie Claude Ptolémée (vers 150 ap. J.-C.). La première ligne désigne non pas une étoile mais une nébuleuse. La deuxième décrit Betelgeuse, donne sa longitude et sa latitude, et lui assigne une magnitude de 1. Dans la dernière colonne, Ptolémée assigne en effet une grandeur aux étoiles, le nombre 1 étant attribué à la plus brillante et 6 à la plus faible. L'autre étoile de première grandeur, qui sera ultérieurement connue sous le nom de Rigel, est décrite quelques lignes plus bas comme « l'étoile brillante qui est dans le pied gauche en contact avec l'eau ».

Suite à l'acquisition d'un manuscrit d'Aratus datant du IX^e siècle dans la version de Germanicus, aujourd'hui conservé à la Reijksuniversitet de Leyde, Hugo de Groote, dit Grotius (1583-1645) entreprit une belle édition des *Phénomènes* d'Aratus qui vit le jour en 1600. Les illustrations représentent le chasseur Orion de dos, le bras gauche couvert d'une peau de lion. Les étoiles qui courent le long de sa colonne vertébrale sont une pure invention du graveur.

Dans Hyginus, *Poeticon astronomicon* (Venise, 1482), la gravure

représente Orion vu de face, armé d'un bouclier et d'une massue. Bien que les positions des étoiles soient indiquées, elles ont peu de rapport avec les positions décrites par Hyginus, et encore moins avec la réalité.



**Orion vu de dos,
dans Grotius (1600).**



**Orion vu de face,
dans Hyginus (1482).**



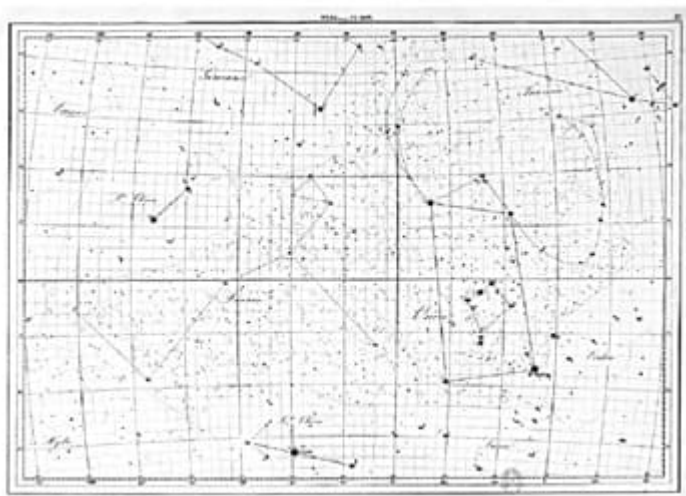
**Représentation médiévale
(XIII^e siècle).**



**Orion dans l'Atlas de Bayer (1602),
marquant un renouveau
de l'uranométrie.**

Les représentations figuratives de la constellation d'Orion ont beaucoup changé tout au long de l'histoire de l'uranométrie (discipline qui traite des cartes du ciel), jusqu'à la disparition des figures mêmes des constellations et l'apparition de la photographie, au XIX^e siècle.

À partir des années 1950, les cartes du ciel ont été réalisées photographiquement à l'aide d'instruments à large champ (voir [cahier 2, figure 18](#)), utilisant des émulsions soigneusement calibrées en fonction des différentes longueurs d'onde. Les atlas de l'ESO (European Southern Observatory), tout comme celui réalisé au mont Palomar (Palomar Sky Survey), existent en version « souple » sous forme de films servant principalement à la préparation des observations, ou en version « dure » sous forme de plaques de verre destinées à des mesures de grande précision.



Disparition du personnage d'Orion, mais maintien des lignes principales de la constellation (Atlas de Dien, 1851).

La nébuleuse d'Orion

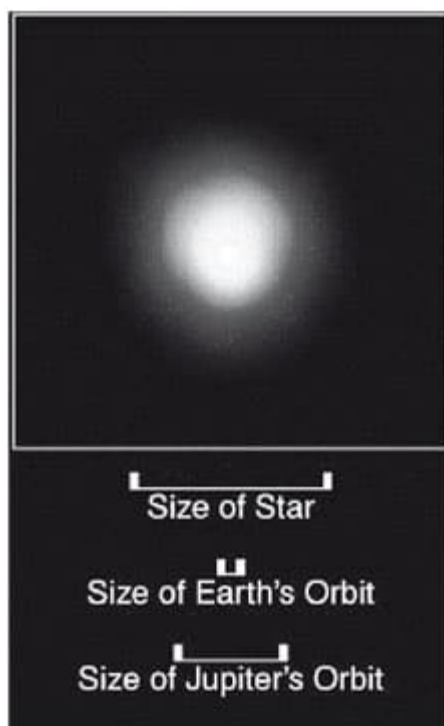
La première mention de cet objet en tant que nébuleuse est due à Fabbri de Peiresc, en 1611. Christian Huygens en donna une description dans son *Systema Saturnium*, publié en 1659. La nébuleuse fut soigneusement dessinée par Messier en 1771 et incluse dans son catalogue sous le numéro M 42.

Située à 1 500 années-lumière de distance, le long du bras spiral de la galaxie auquel appartient aussi le Soleil, la nébuleuse d'Orion se distingue au milieu de l'« épée » d'Orion. Le centre de la nébuleuse est occupé par le Trapèze, un groupe d'étoiles chaudes formées au cours du dernier million d'années. Le puissant rayonnement ultraviolet émis par ces étoiles excite le gaz de la nébuleuse, le chauffe et le fait briller. Outre le Trapèze, cette caverne stellaire renferme 700 étoiles jeunes dont s'échappent des jets gazeux supersoniques, qui pénètrent le gaz de la nébuleuse à la vitesse de 150 000 km/h. Ces ondes de choc sont visibles sous forme de boucles minces terminées par des nœuds

brillants. Au-dessus du Trapèze, la région sombre – le Golfe – est constituée d’hydrogène plus froid (voir [cahier 2, figures 19](#)). Un vaste nuage moléculaire se trouve derrière la nébuleuse, siège de la formation d’étoiles. La nébuleuse, actuellement visible, sera remplacée dans quelques dizaines de milliers d’années par une nouvelle région d’hydrogène ionisé par les étoiles actuellement en formation.

Deux vues d’Orion, en lumière visible et en rayons X

En 1990-1991, le satellite allemand ROSAT a effectué la première cartographie complète du ciel dans le domaine des rayons X. Pour visualiser des données qui sont en dehors du domaine visible, les astronomes ont reconstitué une image en couleurs montrant la région d’Orion (5 228 objets dans un champ d’environ $50^\circ \times 75^\circ$) en rayons X, de telle façon que cette image puisse être directement comparée à une autre perçue dans le domaine optique. Notons que la Lune est présente dans les images (voir [cahier 2, figures 20](#)).



Gros plan sur Betelgeuse.

Les étoiles sont si lointaines que, malgré leur taille, elles apparaissent comme des points. Le 3 mars 1995, toutefois, le télescope Hubble a capté l’image étendue d’une étoile autre que le Soleil : Alpha Orionis, plus connue sous le nom de Betelgeuse, est une supergéante rouge à l’atmosphère si étendue que, si elle était placée au centre du système solaire, elle engloberait

Pour finir, délaissions le domaine de l'astronomie pour revenir sur celui de la rêverie, mystique comme chez Thérèse de Lisieux, ou poétique. Orion a toujours été un thème de choix pour les poètes. Dès la haute Antiquité, Homère et Hésiode ont mentionné la constellation dans leurs épopées.

Le poète André Chénier (1762-1794) est le meilleur exemple de cette influence revue par l'esprit cartésien. À l'aube de la Révolution française, l'heure n'est plus en effet à la religion, mais à la science. La rêverie nocturne devient plus didactique. Son grand poème *L'Amérique*, à peine ébauché, devait chanter l'épopée de la science et du progrès. Son hymne à la nuit s'achève dans un émerveillement qui relève d'une nouvelle religiosité cosmique :

« Accours, grande nature, ô mère du génie.
Accours, reine du monde, éternelle Uranie,
Soit que tes pas divins sur l'astre du Lion
Où sur les triples feux du superbe Orion
Marchent, ou soit qu'au loin, fugitive emportée,
Tu suives les détours de la voie argentée,
Soleils amoncelés dans le céleste azur
Où le peuple a cru voir les traces d'un lait pur ;
Descends, non, porte-moi sur ta route brûlante ;
Que je m'élève au ciel comme une flamme ardente. »

On le comprend, les « triples feux » du poète font allusion aux fameuses étoiles du Baudrier, qui portent les beaux noms arabes de Alnitam, Alnitak et Mintaka – et qui, nous l'avons dit, forment la barre horizontale du « T » dessiné par Thérèse de Lisieux.

Au XX^e siècle, c'est Blaise Cendrars (1887-1967) qui a écrit les pages les plus frappantes sur Orion. Une pure aventure poétique, tel fut le choix de vie de cet écrivain bourlingueur et passionné d'astronomie, comme en témoignent ses œuvres et le contenu de sa bibliothèque privée. Mais sa vision du cosmos est pour le moins originale. Ainsi, dans Orion que les Anciens figuraient par un chasseur légendaire, Cendrars voit une main. Sa main, coupée. Gravement blessé en septembre 1915 sur le front de Champagne, Cendrars fut en effet amputé de l'avant-bras droit. Cette main absente le fera toujours souffrir. Dans ses *Feuilles de route* (1924-28), il écrit (de l'autre main) :

« ORION
C'est mon étoile
Elle a la forme d'une main
C'est ma main montée au ciel
Durant toute la guerre je voyais Orion par un créneau
Quand les Zeppelins venaient bombarder Paris ils venaient toujours d'Orion
Aujourd'hui je l'ai au-dessus de ma tête

Le grand mât perce la paume de cette main qui doit souffrir
Comme ma main coupée me fait souffrir
Percée qu'elle est par un dard continuel. »

1- Article paru en 2003 dans la revue *Vie thérésienne* (n° 172).

Le Noir de l'Étoile : la musique des pulsars¹

Temps des astres et temps des hommes

— Que se passe-t-il ? Quel est donc ce son qui remplit mes oreilles, si intense et si agréable ?

— Ce son provient des globes que tu vois : l'impulsion et le mouvement de ces orbes sont réglés selon certains intervalles inégaux, obéissant à des rapports de proportion très exacts. Les plus aigus sont tempérés par les plus graves, et leur équilibre donne différentes harmonies. Le trajet le plus élevé, celui du ciel, qui transporte les étoiles, est très rapide et produit un son très aigu et perçant ; au contraire le trajet lunaire, le plus bas, produit un son extrêmement grave. Ces huit trajets, dont deux ont la même force, produisent par leurs intervalles sept sons différents ; car c'est ce nombre qui est la clé de presque toutes choses. [...] Mais vous les hommes, vos oreilles sont assourdies, parce qu'elles sont emplies de ce son. Vous êtes comme ceux qui habitent à Catadupa, au bord des chutes du Nil : le fracas immense fait que ce peuple n'entend même plus. C'est ce qui se passe pour le son que produit l'univers en tournant si rapidement : il est si intense que les oreilles des hommes sont incapables de l'entendre, tout comme vous ne pouvez regarder le soleil.

CICÉRON,

« Le Songe de Scipion »,
extrait de *La République*,
livre VI, trad. Les Belles Lettres.

C'est ainsi que Cicéron conte le voyage imaginaire de son héros à travers les immensités cosmiques. Au cours de son ascension, à la fois physique et spirituelle, Scipion découvre peu à peu cette musique des sphères qui est l'un des thèmes favoris de l'Antiquité. Pour les premiers visionnaires de la cosmologie, le monde a d'exactes proportions mathématiques ; il doit donc être en correspondance avec les intervalles musicaux. La théorie sous-jacente est le système harmonique attribué à Pythagore, qui dominera l'histoire de la musique occidentale à travers l'Antiquité, le Moyen Âge et la

Renaissance, avant que la gamme tempérée soit introduite au XVII^e siècle. Ce système est fondé sur la constatation empirique qu'une corde vibrante de longueur donnée, lorsqu'elle est pincée selon certaines proportions arithmétiques, permet de construire une échelle musicale : les intervalles entre notes distinctes sont déterminés par les rapports $2/1$, $3/1$, $4/1$, $3/2$, $4/3$, etc., entre les premiers nombres entiers.

Au II^e siècle de notre ère, l'astronome mathématicien Théon de Smyrne rédige un savant traité sur la musique des sphères. Il veut montrer comment les nombres, la musique et l'astronomie sont reliés. Il met ainsi en correspondance précise les degrés de la gamme à sept tons (nète, hypate, mèse, etc.) avec les notes de la lyre heptacorde inventée par le dieu Hermès, et associées aux sept « planètes » (dont la Lune et le Soleil font partie). Les cordes vibrent en harmonie, tout comme les planètes sur leurs sphères cristallines.

Cette correspondance est poussée très loin à la fin du Moyen Âge et à la Renaissance. La tradition classique considère la musique comme une science mathématique à part entière. Dans le *quadrivium*, elle figure aux côtés de la géométrie, de l'arithmétique et de l'astronomie au rang des disciplines majeures. Johannes Kepler porte à son point culminant l'idée du rapport entre musique et astronomie dans son traité *L'Harmonie du monde* (1619). Ayant découvert l'ellipticité des orbites planétaires, il y voit la source d'une richesse harmonique accrue. Par rapport au cercle, chaque ellipse se caractérise en effet par un paramètre supplémentaire, son excentricité, reliée au rapport entre le grand axe et le petit axe. Les Anciens considéraient que chaque corps céleste émettait un son unique sur une orbite circulaire, d'autant plus haut que sa vitesse était élevée. Kepler associe à chaque planète non plus une, mais plusieurs notes, déterminées par l'ellipticité de la trajectoire. Sur une ellipse, la vitesse d'une planète varie selon qu'elle est plus ou moins proche du Soleil, placé au foyer ; la planète « chante » donc un intervalle délimité par ses vitesses maximale (au périhélie) et minimale (à l'aphélie). L'ensemble des planètes forme une véritable harmonie au sens musical du terme, que Kepler met en parallèle avec la dynamique du système solaire. « Le reflet multiple des astres joue la mélodie, et la nature sublunaire danse sur cette musique », écrit-il, ajoutant naïvement, comme pour justifier sa théorie : « La Terre chante *mi*, *fa*, *mi* afin que tu conjectures à partir des syllabes que la *misère* et la *famine* prévalent dans notre domicile. »

On peut s'étonner du nombre restreint de compositions musicales explicitement inspirées du cosmos : voyages opératiques dans la Lune de Haydn et Janacek, péplum orchestral planétaire de Holst. Dans son opéra *L'Harmonie du Monde* et la suite d'orchestre qu'il en a tirée,

Hindemith adopte fidèlement les correspondances fournies par Kepler et les utilise comme leitmotiv. Dans *Atlas Eclipticalis*, pour orchestre de chambre, le malicieux John Cage utilise une carte stellaire pour déterminer les hauteurs de notes. Stockhausen cherche le chemin des astres dans *Sirius* et certaines parties de son monumental *Licht*. Gérard Grisey, lui, fait chanter les étoiles d'une tout autre manière.

Temps musical et signaux astronomiques

Lorsque Gérard m'écrivit pour la première fois afin de m'exposer son projet, il revenait d'un séjour à l'Université de Berkeley, en Californie (où, un an plus tard, je devais moi-même séjourner comme chercheur au département d'astrophysique). Il y avait rencontré un astrophysicien américain qui lui avait fait entendre divers « sons cosmiques » : éruptions solaires, orages magnétiques, quasars, pulsars. Il s'agit là, bien sûr, d'une métaphore : aucun son ne se propage dans l'espace, puisqu'une onde acoustique a besoin d'un milieu physique vibrant (air, eau, etc.) pour se propager. Dans les espaces interplanétaires ou interstellaires, il n'y a pas de support physique pour les ondes acoustiques. Les astronomes ne reçoivent que des signaux électromagnétiques à différentes longueurs d'onde. Le chant du ciel est un chant de lumière. Les astronomes ont des oreilles géantes pour l'écouter : des télescopes pour capter la lumière visible, des radiotélescopes pour le rayonnement radio ; ils ont lancé en orbite, au-dessus de l'atmosphère, des détecteurs de rayonnement infrarouge, ultraviolet, X et gamma. Si l'œil humain ne perçoit que deux octaves de rayonnement électromagnétique, les instruments modernes en détectent cinquante-deux. Le « magnétophone » de l'astronome embrasse aujourd'hui tout le spectre. C'est comme si l'on pouvait simultanément écouter tous les sons de la planète : un arbre qui craque dans la forêt de Sibérie, un robinet qui fuit dans un appartement de San Francisco ou une sagaie qui siffle dans une vallée de la Nouvelle-Guinée.

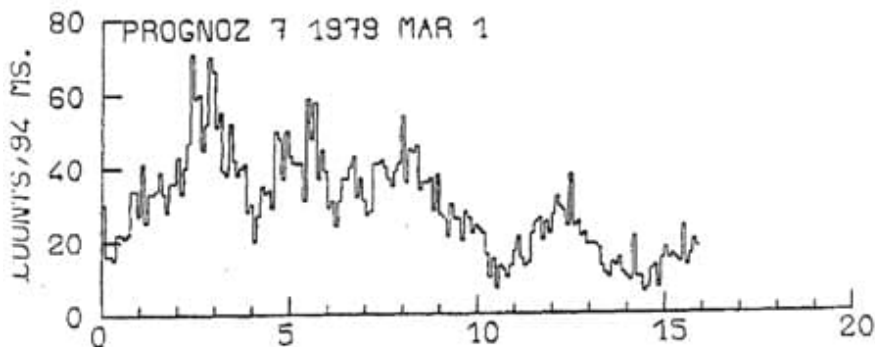
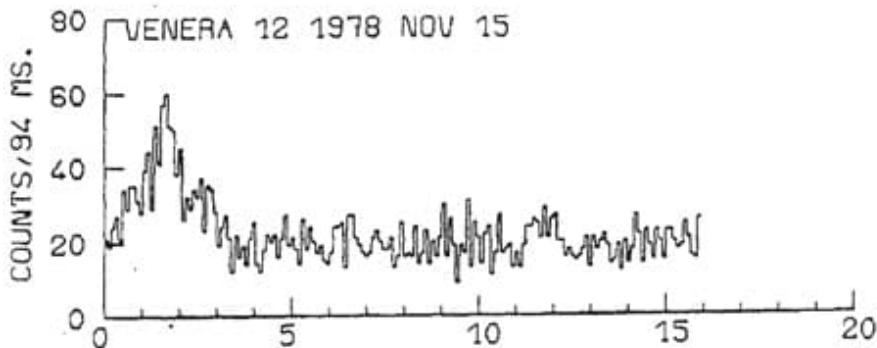
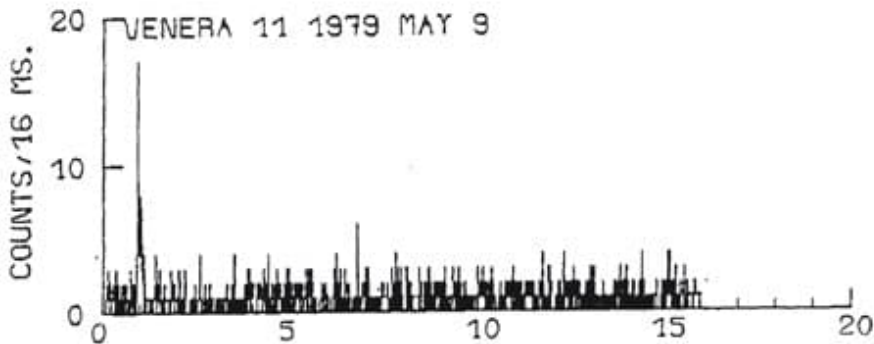
Certains de ces signaux sont émis dans le domaine radio. En frappant le miroir d'un radiotélescope (constitué d'un grillage plan ou parabolique), ils sont convertis en signaux électriques de faible intensité, variables au cours du temps. Il suffit alors de placer un amplificateur à la sortie du radiotélescope et de brancher des haut-parleurs pour transformer le radiotélescope en une sorte de tourne-disque cosmique, qui retranscrit les phénomènes lumineux en phénomènes sonores.

Gérard Grisey avait été extrêmement frappé par ces « sons » venus d'ailleurs, et un projet musical autour de ces signaux cosmiques avait commencé à germer dans son esprit. Dans sa lettre, il tenait déjà

à prendre ses distances avec la traditionnelle croyance en l'harmonie céleste : « N'en déduisez pas cependant que je suis un adepte de la musique des sphères. Il n'est d'autre musique des sphères que la musique intérieure. Celle-là seule pulse encore plus violemment que vos astres, et oblige de temps à autre le compositeur à rester à l'écoute. »

Il s'agit là d'une phrase clé dans la démarche de Gérard Grisey, qui allait constamment le guider dans l'élaboration du *Noir de l'Étoile*. Muni d'une bonne culture scientifique, Gérard lisait des ouvrages de vulgarisation et il savait qu'au XX^e siècle, l'astrophysique avait rendu quelque peu cacophonique l'harmonie céleste rêvée par les Anciens, de Pythagore à Kepler. À l'heure de la relativité, de la radioastronomie et de la conquête spatiale, le concept de musique céleste a bien changé. Éradiqué de la théorie (bien que la plus prometteuse des théories d'unification des quatre interactions fondamentales soit celle des *supercordes*, où l'on suppose que toutes les propriétés des particules élémentaires sont en correspondance avec les modes vibratoires de cordes infinitésimales), il n'en garde pas moins un fort pouvoir d'évocation. Dans l'incessante agitation du cosmos, des étoiles explosent, des nuages interstellaires se fissurent, des galaxies s'interpénètrent. Ce bruit et cette fureur cosmiques contiennent cependant une dynamique temporelle qui interpelle le compositeur. Ce qui a intéressé Gérard Grisey dans la correspondance possible entre certains signaux astronomiques et le processus de composition musicale est le fait que dans le signal électromagnétique reçu par l'astronome, on trouve de façon évidente deux des quatre composantes fondamentales du phénomène sonore : la hauteur (intensité) et la durée (temps), les deux autres étant la dynamique et le timbre.

En simplifiant, parmi les signaux astronomiques émis par les différentes sources cosmiques on compte trois types de variations temporelles : les variations transitoires, les variations erratiques et les variations périodiques.



Signaux transitoires émis par des « sursauts gamma ».

L'échelle temporelle est en secondes. Plusieurs milliers de sursauts gamma ont été à présent détectés, mais ils demeurent l'un des grands mystères de l'astrophysique actuelle, puisqu'on ignore la nature précise des astres émetteurs, en soupçonnant toutefois qu'il pourrait s'agir de la collision entre trous noirs ou étoiles à neutrons situés dans des galaxies lointaines.

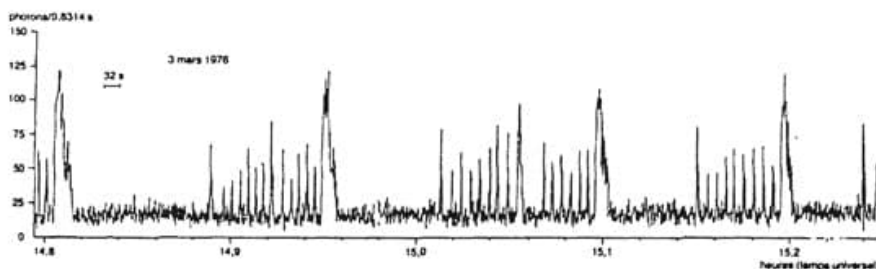
Les *variations transitoires* se traduisent par une brusque montée de l'intensité suivie d'une décroissance. Elles ne se reproduisent plus par la suite car elles sont dues à certains événements uniques et violents, comme l'explosion d'une étoile massive, la formation d'un trou noir ou le choc de corps célestes.

Le signal capté n'est d'ailleurs pas exclusivement de nature électromagnétique. Les explosions de supernovæ s'accompagnent

d'une copieuse émission de particules non lumineuses appelées neutrinos, et la formation de trous noirs par effondrement d'étoiles s'accompagne d'un train d'ondes gravitationnelles.

Les *variations erratiques* sont associées à des sources émettant des bouffées de rayonnement à intervalles irréguliers, comme les éruptions solaires, les orages magnétiques des planètes, les émissions X des systèmes binaires et des quasars. Les deux extraits que je vous fais écouter sur cassette audio ont été engendrés dans notre système solaire. Le premier est une émission décamétrique (c'est-à-dire dans un domaine de longueur d'onde de quelques mètres) de Jupiter, enregistrée à l'Université du Colorado en 1965 à la fréquence radio de 34 MHz avec une bande passante de 3 kHz. Ce qui se passe au juste est l'interaction entre la magnétosphère de la planète géante Jupiter et celle de l'un de ses satellites, Io. Dans la mythologie, Io était l'une des maîtresses du dieu Jupiter, leur relation se caractérisant par de fréquentes disputes. Les variations radioélectriques que nous entendons peuvent ainsi évoquer une dispute magnétique agitée entre les deux partenaires du couple céleste !

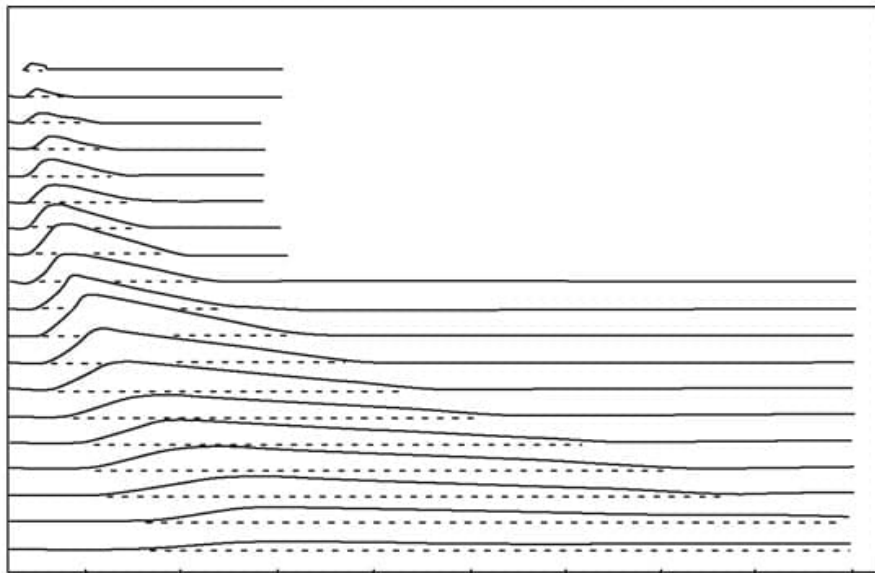
Le second exemple sonore est une éruption solaire de type III, enregistrée à l'Université du Colorado en 1968. Notre étoile qui, vue de loin, paraît stable et calme, est en réalité agitée de nombreuses perturbations. En témoignent les éruptions solaires, immenses protubérances de gaz qui s'élèvent au-dessus de la photosphère solaire jusqu'à plusieurs millions de kilomètres d'altitude, certaines finissant par retomber sous l'effet de la gravité solaire.



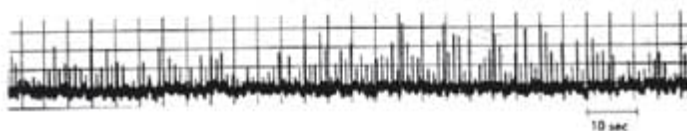
Signaux erratiques émis par une « source à sursauts X ».

Il s'agit vraisemblablement de bouffées de rayonnement de haute énergie engendrées par des grumeaux de matière ultrachaud, se formant de façon aléatoire au sein d'un disque d'accrétion turbulent autour d'un trou noir.

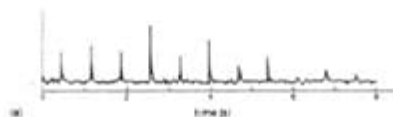
Restent les *signaux astronomiques périodiques*, plus rares. Les plus spectaculaires sont, de loin, ceux qui sont émis par les pulsars.



Éruption solaire de type III observée entre 1 MHz et 30 kHz par le satellite expérimental IMP-6.



PSR 2021+51, $P = 0.529$ sec



PSR 0329+54, $P = 0.714$ sec

Variations périodiques des pulsars PSR 2021 + 51 (période 0,529 seconde) et PSR 0329 + 54 (période 0,714 seconde).

Les pulsars, métronomes célestes

Les pulsars ont été découverts par hasard en 1967. Une jeune astronome anglaise détecta dans le ciel un signal radio variant rapidement, sous forme d'impulsions périodiques espacées de 1,337301130 seconde. L'astre fut baptisé CP 1919 (Cambridge Pulsar, d'ascension droite 19 h 19 min).

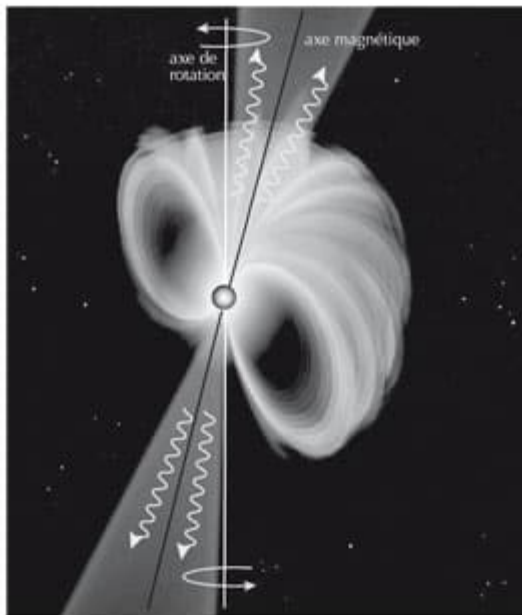
Aussitôt, l'incrédulité s'empara de la communauté scientifique : là-bas, au fond du ciel, quelque chose battait la mesure avec une

régularité de métronome. Les temps d'arrivée des impulsions étaient si réguliers – au milliardième de seconde près – que pendant quelque temps on crut qu'il s'agissait d'un message envoyé par une civilisation extraterrestre, à destination des autres peuples de l'Univers.

Quelques mois plus tard, les astrophysiciens dévoilèrent une vérité tout aussi surprenante : les signaux étaient émis par des pulsars, fantastiques résidus compacts engendrés dans les explosions de supernova qui ont jadis désintégré les étoiles massives.

Pourquoi de telles explosions ? Une étoile, comme le Soleil le fait actuellement, brûle d'abord de l'hydrogène dans des réactions de fusion thermonucléaire, puis fabrique une gamme successive d'éléments de plus en plus lourds, jusqu'à atteindre le fer, l'élément le plus stable de la nature – donc inapte à fusionner pour en créer d'autres. C'est alors que la catastrophe a lieu. Le cœur de l'étoile, désormais incapable de soutenir son propre poids en dégageant de l'énergie nucléaire, s'affaisse sur lui-même en une fraction de seconde. Il forme un objet cosmique d'une extrême densité, sur lequel l'enveloppe stellaire, comme une vague sur une jetée, rebondit et rejaillit de toutes parts. C'est l'explosion de supernova.

Le noyau dur formé au centre est presque exclusivement composé de neutrons (avec les protons, constituants fondamentaux des noyaux atomiques). D'une masse comparable à celle du Soleil mais d'un rayon de 10 kilomètres seulement, l'étoile à neutrons est d'une densité folle : mille milliards de fois celle de l'eau. Autrement dit, un dé à coudre d'une telle matière, ramené sur Terre, aurait le poids d'une montagne !



Modèle de pulsar.

Les étoiles à neutrons sont de gigantesques *toupies aimantées*. Des toupies, car au cours de leur formation, leur vitesse de rotation a considérablement augmenté. Certaines pivotent sur elles-mêmes plusieurs dizaines de fois par seconde. Des aimants aussi, car leur champ magnétique est mille milliards de fois plus grand que celui de la Terre. Les lignes de force magnétique d'un pulsar canalisent les particules électrisées de l'espace interstellaire le long de son axe magnétique, ce qui permet l'émission d'un faisceau de lumière tournant en même temps que l'étoile, à la façon d'un phare cosmique. À chaque tour, le faisceau balaie la ligne de visée de la Terre et les astronomes enregistrent une pulsation lumineuse. D'où leur nom de pulsars.

Tremblements d'étoiles

En vingt-cinq ans, plus de quatre cents pulsars ont été découverts, tous battant des cadences rapides et presque inflexibles. On en a par exemple découvert un, accomplissant trente-trois tours par seconde, dans la nébuleuse du Crabe, reste d'une supernova vue par un astrologue chinois en 1054.

La rotation d'un pulsar se ralentit lentement au cours du temps, à mesure qu'il dissipe de l'énergie (les pulsars jeunes tournent donc en général plus vite que les anciens). Outre ce lent ralentissement, un autre phénomène peut modifier de façon plus abrupte leur vitesse de

rotation : ce sont les *glitches* (terme anglo-saxon désignant un incident subit et imprévisible dans le fonctionnement ordinairement parfait d'un appareil électronique). Les *glitches* diminuent la période de rotation d'un pulsar d'un millionième de seconde en l'intervalle de quelques jours, après quoi le pulsar s'établit dans un nouvel état stable. Les *glitches* s'interprètent comme de véritables tremblements d'étoiles, dus à certaines instabilités qui affecteraient la croûte ou le cœur des étoiles à neutrons. Une étoile à neutrons est légèrement aplatie aux pôles et enflée à l'équateur ; en raison des tensions de surface causées par l'aplatissement, des fissures peuvent lézarder sa croûte et déclencher un réajustement brutal vers une configuration plus sphérique. Ce réajustement, de l'ordre du millimètre seulement, met néanmoins en jeu une énergie colossale. Un tremblement de pulsar dégage un milliard de milliards de fois plus d'énergie que les plus violents séismes que la Terre ait jamais connus.

Les gardiens du temps

En 1982, la découverte d'un pulsar effectuant plus de 600 tours par seconde – vingt fois plus vite que le plus rapide des pulsars jusqu'alors connus – fit sensation. La valeur était très proche de la limite permise. Les lois de la physique interdisent en effet à un pulsar de tourner en moins d'une milliseconde, faute de quoi il volerait en éclats sous l'effet de colossales forces centrifuges. D'autres pulsars « ultrarapides » ont été découverts depuis. Contrairement à ce que l'on pouvait penser, ces pulsars particuliers ne sont pas très jeunes ; il s'agit plutôt de vigoureux vieillards, accélérés à un moment de leur histoire par le subit transfert de matière en provenance d'une étoile compagne. Ces pulsars doubles ont une fréquence de rotation si régulière que les physiciens ont sérieusement envisagé de les utiliser comme garde-temps officiels. N'augmentant que d'un milliardième de seconde par siècle, leur période de rotation présente une stabilité comparable à celle des meilleures horloges atomiques !

Le radiotélescope, magnétophone cosmique

Dans la tornade électromagnétique délivrée par un pulsar, le rayonnement radio ne représente qu'un chuchotement, mais c'est lui qui est capté à l'aide des grands radiotélescopes. Tenter de comprendre le fonctionnement d'un pulsar revient donc à tenter de comprendre le fonctionnement d'une grosse machine cachée dans une usine en n'écoutant que les quelques bruits sourds qui s'en échappent.

Les radiotélescopes sont des radars perfectionnés conçus pour détecter les signaux radio de faible intensité en provenance des astres lointains. Ils sont constitués de grandes surfaces métalliques, lisses ou

grillagées, sur lesquelles les ondes radio se réfléchissent. Des antennes transforment les ondes en signaux électriques. L'énergie collectée est infime... En cinquante ans d'observations, l'ensemble de l'énergie recueillie par tous les radiotélescopes du monde équivaut à peu près à celle qu'il faut pour tourner la page d'un livre.

Il faut donc amplifier ces signaux pour les étudier. Par jeu, des astronomes ont eu l'idée de brancher un haut-parleur à la sortie de leur radiotélescope. La membrane du haut-parleur, excitée par le signal électrique variable, se met à vibrer à l'unisson des forces cosmiques. L'oreille humaine peut alors entendre le cliquètement des pulsars.

Sur les centaines de pulsars aujourd'hui connus, certains tournent très vite car ils sont très jeunes, tandis que les plus âgés perdent de l'énergie et ralentissent.

Lorsque Gérard Grisey m'avait interrogé sur ces différents rythmes cosmiques, je lui avais signalé une découverte importante de l'époque, à savoir les « pulsars milliseconde », ainsi nommés car leur période de rotation est de l'ordre de quelques millisecondes, correspondant à des fréquences allant de 80 à 630 Hertz. Ces fréquences entrent dans le spectre audible à l'oreille humaine ; en d'autres termes, les battements sont si rapprochés qu'ils engendrent des notes de musique. Un pulsar ultrarapide tournant 440 fois sur lui-même chaque seconde émettrait par exemple la note *la* du diapason moderne. On connaît actuellement une douzaine de pulsars rapides dont les fréquences et les « notes correspondantes » sont indiquées dans le tableau.

Liste des pulsars ultrarapides

Nom du pulsar	Période (millisec.)	Fréquence (hertz)	Note approximative
1744-24A	11.6	86	fa - 2
1620-26A	11.1	90	fa#-2
1516+02B	7.9	126	si - 2
1953+29	6.1	164	mi - 1
1855+09	5.4	185	fa#-1
0021-72A	4.5	222	la - 1
0021-72E	3.5	285	do# 0
0021-72H	3.2	312	ré# 0
0021-72	2.1	475	la# 0
0021-72K	1.8	555	do# 1
1957+20	1.6	625	ré# 1

Quant aux pulsars moins rapides, ils font entendre un martèlement rappelant celui de percussions africaines. Ce sont ceux-là que Gérard Grisey avait gardés dans l'oreille depuis son retour de Berkeley, imaginant toutes sortes d'utilisations possibles.

Genèse du *Noir de l'Étoile*

En eux-mêmes les sons de pulsars ne sont pas « beaux ». On peut en fabriquer de beaucoup plus sophistiqués dans les studios électroacoustiques. Mais Grisey ne voulait précisément ni les manipuler, ni les transformer. Il a aussi éliminé les pulsars trop rapides, correspondant à des notes de musique, pour ne finalement garder que ceux qui tournent assez lentement pour engendrer des *tempi* assimilables aux percussions.

Voilà donc le matériau sonore brut dont disposait Gérard Grisey, et l'explication qu'il a lui-même donnée plus tard sur la façon dont il a voulu travailler avec ces sons : « Lorsque, en 1985, je rencontrai à Berkeley l'astronome et cosmologiste Joe Silk, il me fit découvrir les sons des pulsars. Je fus séduit par ceux du pulsar de Vela et immédiatement je me demandai à la manière de Picasso ramassant une vieille selle de bicyclette : que pourrais-je bien en faire ? La réponse vint lentement : les intégrer dans une œuvre musicale sans les manipuler, les laisser exister simplement comme des points de repère

au sein d'une musique qui en serait en quelque sorte l'écrin ou la scène, enfin d'utiliser leurs fréquences comme *tempi*, et développer les idées de rotation, de périodicité, de ralentissement, d'accélération et de *glitches* que l'étude des pulsars suggère aux astrophysiciens. La percussion s'imposait parce que, comme les pulsars, elle est primordiale et implacable, et comme eux, elle cerne et mesure le temps. Non sans austérité. Enfin je décidai de réduire l'instrumentarium aux peaux et aux métaux, à l'exclusion des claviers. *Le Noir de l'Étoile* était né ou presque. Il restait à imaginer un complément lumineux de la partition, à élaborer une scénographie, à convaincre la communauté des astronomes de Nançay et de Meudon de transmettre un pulsar dans la salle de concerts, enfin de réunir une équipe qui fût autant passionnée que moi par le projet. Lorsque la musique parvient à conjurer le temps, elle se trouve investie d'un véritable pouvoir chamanique, celui de nous relier aux forces qui nous entourent. Dans les civilisations passées, les rites lunaires ou solaires avaient une fonction de conjuration. Grâce à eux les saisons pouvaient revenir, et le soleil se lever chaque jour. Qu'en est-il de nos pulsars ? Pourquoi les faire venir ici aujourd'hui, à l'heure où leur passage dans le ciel les rend accessibles ? Bien sûr, nous savons qu'avec ou sans nous, 0329+54 et le pulsar de Vela continueront leurs rondes interminables et indifférentes, balaieront les espaces inter-sidéraux de leurs faisceaux d'ondes électromagnétiques, avec ou sans nous. Mais n'est-ce pas en les piégeant dans un radiotélescope, puis en les intégrant dans un événement culturel et sophistiqué – le concert, qu'ils nous renvoient alors plus que leur propre chant ? En effet, le moment du passage d'un pulsar dans le ciel nous astreint à une date précise, et en rivant le concert sur cette horloge lointaine, il devient un événement *in situ*, ou plus exactement *in tempore*, donc relié aux rythmes cosmiques. Ainsi, les pulsars détermineront non seulement les *tempi* ou pulsations du *Noir de l'Étoile*, mais également la date et l'heure précises de son exécution. Musique avec pulsar obligé. »



Vestige de l'explosion de supernova qui a engendré le pulsar de Vela, dans l'hémisphère Sud.

Le pulsar, invisible sur ce cliché optique, a une période de 0,0893 seconde, c'est-à-dire qu'il tourne onze fois par seconde sur lui-même. À la distance de 1 500 années-lumière de la Terre, on estime qu'il a été engendré il y a 12 000 ans.

Lorsque Gérard Grisey m'a contacté à l'Observatoire de Meudon, je l'ai présenté au groupe de chercheurs spécialisé dans l'étude des pulsars au radiotélescope de Nançay, en Sologne. Nous lui avons fourni une liste des pulsars connus et détectables. L'idée maîtresse de Grisey était née : une partition pour six percussionnistes, bande magnétique et retransmission *in situ* de signaux astronomiques. L'œuvre a été commanditée par les Percussions de Strasbourg.

Guest stars

Le Noir de l'Étoile met en scène deux acteurs principaux : des pulsars invités. À deux moments de la partition, les six musiciens font silence pour laisser la voie libre aux sons de pulsars diffusés par une batterie de haut-parleurs. Ils sont annoncés au début du concert, par un texte lu en voix off, dans le noir – sorte d'avertissement au mystère qui va suivre. La musique les intègre comme des visiteurs étranges, leur proposant des fenêtres d'accès et des silences qu'ils habitent librement. Il n'y a pas tentative d'amalgame, c'est-à-dire de dialogue entre les percussionnistes et les petites étoiles.

La première *guest star* a été enregistrée sur bande magnétique par des radioastronomes australiens, car elle ne peut être observée que dans l'hémi-sphère Sud. Le pulsar se nomme Vela, résidu de

l'explosion d'une supernova que les hommes primitifs ont sans doute vue en plein jour, il y a 12 000 ans. Il tourbillonne sur lui-même onze fois par seconde.

La seconde *guest star* est captée au moment même du concert par une station de radioastronomie (les signaux étant transmis par lignes téléphoniques). Ce *direct* avec le cosmos lointain engendre, bien entendu, une extraordinaire émotion, mais pose de sérieux problèmes de transmission. Les pulsars ne sont pas toujours audibles ; ils sont masqués par le bruit d'antenne, les parasites, la scintillation stellaire, etc. Le choix est finalement très limité. Jusqu'à présent, les diverses représentations – l'œuvre a été créée à Bruxelles (*Ars Musica*, 16 mars 1991), puis jouée à Strasbourg en création française (Festival Musica, 22 septembre 1991), Huddersfield (Angleterre), Grenoble, Portugal, Pays-Bas, Autriche, etc. – n'ont fait appel qu'au pulsar 0329+54 (les chiffres indiquent ses coordonnées équatoriales : 3 h 29 min d'ascension droite et + 54 degrés de déclinaison). Il effectue 1,4 tour par seconde (quatre-vingt-quatre coups à la minute, le rythme d'un battement cardiaque). La supernova qui l'a engendré a explosé il y a 5 millions d'années et ses impulsions radio mettent 7 500 ans pour parvenir à la Terre.

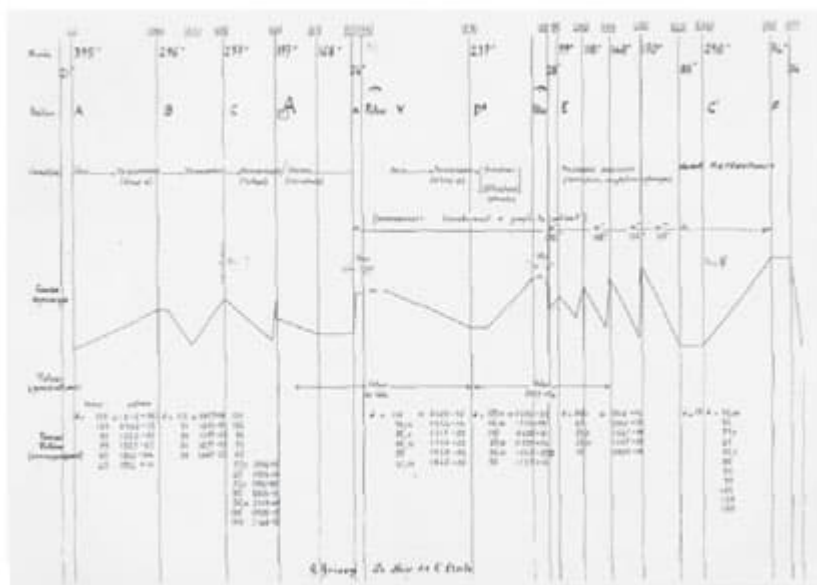
Le rendez-vous avec ce tambourineur céleste se prépare avec passion et minutie. Le rythme cosmique doit arriver dans la salle de concerts à l'heure juste. Le pulsar n'attend pas les spectateurs pour jouer. Devant la fenêtre d'un radiotélescope à miroir fixe, tel celui de Nançay en Sologne, il ne passe qu'une demi-heure (lors de la représentation anglaise, c'est le radiotélescope de Jodrell Bank qui a capté les sons, avec une sensibilité supérieure à celle du radiotélescope français de Nançay. De plus, ce radiotélescope étant orientable, les contraintes horaires étaient moins sévères. Il est intéressant de noter que ces « excursions culturelles » n'interfèrent pas avec les programmes scientifiques du télescope ; en effet, les radioastronomes tournent de façon routinière leur télescope vers divers pulsars pour vérifier leur chronométrage et observer les variations du milieu interstellaire traversé par les ondes radio. Le concert n'est donc qu'une façon de faire coïncider ce pointage de routine avec une représentation musicale). Son passage se décale chaque jour de cinq minutes, et il y a des époques de l'année où le pulsar devient inaudible car il est trop bas sur l'horizon. Le même pulsar peut passer à 6 heures du matin ou 11 heures du soir. Pour cette raison, la création de l'œuvre, le 16 mars 1991 à Bruxelles, débuta à 17 heures, les signaux du pulsar 0329+54 arrivant à 17 h 46 précises.

Le concert ainsi rivé sur ces horloges lointaines, l'auditeur est relié aux forces cosmiques. Les six percussionnistes sont perchés sur des estrades disposées en orbite autour du public. Au firmament

luisent des champs lumineux et des velums tendus comme les ailes de grands oiseaux blancs. Pas de chatoyante fresque lumineuse : à part le noir et le blanc, les couleurs sont limitées au rouge et au bleu, parce que ce sont les couleurs des étoiles. C'est de cette forge mystérieuse qu'émergent les implacables crépitements de Vela ou les lourds battements de cœur de 0329 + 54, danses et chants de la mort joués à plusieurs milliers d'années-lumière par des astres moribonds.

Noir de l'Étoile et musique spectrale

Le Noir de l'Étoile est une œuvre essentiellement rythmique et spatiale. Les hauteurs des peaux, des bois et des métaux, schématisées à l'extrême et vite repérées par l'oreille, autorisent une concentration aiguë sur la structure temporelle. Toute l'organisation de la partition provient des vitesses de rotation et des timbres engendrés par des pulsars choisis dans le catalogue. Ces rythmes ne jouent pas vraiment le rôle de cellules de base, mais plutôt de véhicules du temps. Les quelque cent vingt percussions suivent le principe de vie de ces masses sidérales : rotation du son, périodicité, ralentissements, accélérations, irrégularités, brisures. Le discours musical oscille en permanence entre ces pôles, se frayant un chemin entre le semblable et le différent, tendant toujours vers l'intérieur même du son. Ce lent parcours de la macrophonie vers la microphonie évoque une machine à dilater le temps, dont l'effet de zoom laisserait peu à peu percevoir le grain du son, puis la matière même.



Partition synthétique du *Noir de l'Étoile*. Manuscrit de Gérard Grisey.

Chacune des séquences A, B, C, D, etc., est gouvernée rythmiquement par les tempi de

pulsars, dont les noms sont indiqués en bas et les vitesses de rotation sont exprimées en nombre de noires à la minute.

Les pulsars offrent donc des recoupements évidents avec tout ce qui intéresse la *musique spectrale*. Cette conception musicale, qui a vu le jour dans les années 1970 sous l'impulsion de Gérard Grisey et Tristan Murail, veut donner une fonction à l'ensemble des phénomènes sonores. Ne pas restreindre, par exemple, le matériau de l'élaboration musicale à un ensemble de notes constituées en gammes diatoniques ou chromatiques, mais utiliser aussi pleinement le spectre des harmoniques d'un son. Une caractéristique majeure de la musique spectrale est l'étirement du son, obtenu par une transposition du microphonique (le spectre des harmoniques) au macrophonique (la synthèse instrumentale). Ce procédé a de puissantes répercussions sur la notion même de temps musical. D'ordinaire, le discours musical s'articule sur des mouvements, des gestes, des signes qui se déroulent tous à la vitesse du langage humain. L'étalement spectral, en permettant d'ausculter l'intérieur même des sons, révèle un temps radicalement autre. Grisey cite fréquemment l'exemple des baleines, des hommes et des oiseaux. Quand l'homme écoute le chant des baleines, ce qui paraît être un immense gémissment étiré n'est sans doute, pour elles, qu'une consonne, de même qu'à l'inverse, nous ne percevons les conférences des oiseaux que sous forme de cadences incroyablement rapides et de timbres suraigus.

On voit de plus en plus fréquemment, dans les arts plastiques, l'utilisation un peu gratuite d'une idée-force empruntée à la science. Souvent, hélas, l'artiste se contente du concept et les choses en restent là. Les concepts de l'astrophysique moderne – densité, coagulation, entropie, transitions de phase, *glitches*, etc. – sont au contraire en adéquation parfaite avec ceux de la musique spectrale. La musique de Grisey est donc bien à l'image des astres : tour à tour rythmique, violente, lancinante, haletante, resserrée, étirée. Elle fait entendre le grain du son, l'écume de l'espace et du temps incessamment recommencée.

Structure générale du *Noir de l'Étoile*

1. Introduction

(texte original de J.-P. Luminet dit par voix off spatialisée)

2. Percussions de Strasbourg disposées autour du public et sonorisées

Naissance d'une pulsation sonore lumineuse.
Rotations, périodicités, accélérations, décélérations.
Découverte de l'espace acoustique et visuel.
Lent parcours de la macrophonie à la microphonie.
Attente de l'« objet céleste ».

3. Première fenêtre

Transmission du pulsar de Vela diffusé et spatialisé par 12 haut-parleurs disposés autour du public.

4. Contamination de la vitesse du pulsar aux percussionnistes

Rotations, irrégularité, rapidité.
Jeux de rythmes de lumière et d'espace.

5. Deuxième fenêtre

Arrivée en direct du pulsar 0329+54 capté par le radiotélescope et spatialisé par les 12 haut-parleurs.

6. Interruption brutale par les percussionnistes

Découverte d'un autre espace sonore : les métaux.
Chaos granuleux, fusion, coagulations, émergences, bouffées rythmiques. Vibrations lumineuses sur les voiles.

7. Troisième fenêtre

Pulsar imaginaire.

8. Final

Déchaînement progressif des forces centrifuges sonores et lumineuses. Variations de vitesse et d'accélération.

9. Quatrième fenêtre

L'instrument-pulsar.

Je me souviens d'ailleurs qu'en 1989, pendant l'élaboration du *Noir de l'Étoile*, Gérard était en train de composer une autre pièce, pour 4 percussions, synthétiseur et orchestre de chambre, qu'il a fini par intituler *Le Temps et l'écume* à la suite d'une conversation que nous avons eue dans le parc de l'Observatoire de Meudon (il adorait la verdure), avant que je ne parte moi-même à Berkeley pour un an. Je lui parlai des dernières recherches en cosmologie, portant sur les tout premiers instants du Big Bang, en particulier d'un modèle étrange et spéculatif – depuis devenu à la mode dans la communauté des cosmologistes – appelé poétiquement « l'écume de l'espace-temps ».

On imagine un océan d'énergie non spatial et non temporel qui baigne toutes choses depuis toujours. Cet océan fluctue, et si on pouvait l'observer minutieusement avec la résolution suffisante, on verrait que cet océan est agité de fluctuations d'énergie semblables à des vagues bouillonnantes, les vagues les plus puissantes soulevant de l'écume qui se détache de l'océan. Cette écume d'espace-temps peut non seulement engendrer des particules élémentaires, mais même des univers à part entière.

Quant au titre du *Noir de l'Étoile*, je vous lis pour terminer quelque vers de François Jacqmin qui, je le crois, s'appliquent pleinement à la conception de Gérard Grisey : « L'ombre est une insatiable circonspection étoilée. C'est ce diamant noir que l'âme perçoit lorsque l'infini affleure. » Gérard Grisey faisait de toute évidence partie de ces observateurs perspicaces qui devinent la lumière dans le noir de la nuit.

1- D'après une conférence donnée le 10 juin 1999 à l'université Paris-IV-Sorbonne, lors du colloque international « Hommage à Gérard Grisey, pour une esthétique de la création musicale ».

Univers et littérature

« Ah ! pouvoir consacrer son temps à lire les poètes, à connaître les travaux des savants... c'est la vie, cela !
– Il faut bien jouer aussi, dit Marinette. »

Marcel AYMÉ,
Les Contes du chat perché.

Le rêve de l'Univers¹

Dans une lettre adressée à l'écrivain Villiers de l'Isle-Adam datée de 1866, Stéphane Mallarmé écrivait : « J'avais, à la faveur d'une grande sensibilité, compris la corrélation intime de la Poésie avec l'Univers, et pour qu'elle fût pure, conçu le dessein de la sortir du Rêve et du Hasard et de la juxtaposer à la conception de l'Univers. »

Les bouleversements de l'image du monde apportés par les grandes découvertes scientifiques – en particulier astronomiques – alimentent depuis toujours l'imagination des poètes. Devant certaines hypothèses scientifiques, des mythes anciens resurgissent, prennent soudain consistance, et la sensibilité poétique jaillit. Pourquoi un tel transfert ? Parce que la poésie se voulant à chaque instant contemporaine, elle est forcément liée aux grandes découvertes de son temps. Le véritable poète vit à l'écoute de son époque et ne se réfugie pas de manière passéiste dans ce qui fut. À l'instar du scientifique, il est l'inventeur incessant d'un nouveau dire, d'une langue toujours plus universelle. Le poète veut former de nouvelles figures, non pas écrites dans la formulation abstraite des mathématiques, mais dans celles des mots. Le poète est un risqueur du dire. Il ne peut donc être indifférent aux risqueurs de la connaissance que sont les chercheurs. Ces derniers, quant à eux, ont besoin de la fulgurance des métaphores, de la musique des mots forgée par les poètes.

En fait, la poésie, c'est aussi de la recherche fondamentale. Poésie et recherche exigent un même effort de discipline et de concentration, un même goût de la formule concise et juste (même si pour parvenir au but cherché, les moyens d'expression et les « états » intellectuels ou émotionnels sont très différents). Gilbert Lély a défini la poésie de la façon suivante : « À chaque interrogation du monde extérieur, la réponse la plus rapide, la plus nettement articulée, la plus libre, la plus dévorante. » On ne saurait mieux caractériser la passion du scientifique.

Au-delà de ces généralités, force est de constater qu'il existe deux sortes de poètes scientifiques : ceux qui imitent et ceux qui inventent. Les premiers ont engendré tout le courant de la poésie dite didactique ; il s'agit de poèmes composés sur des thèmes fournis par la

science, qui exaltent les découvertes ou la persévérance passionnée des savants. Le poète didactique double ainsi la parole du scientifique, en se servant du langage lyrique et de la métaphore pour tenter d'exprimer différemment une émotion qui ne passe pas par les équations. La science fournit en quelque sorte un « émerveillement extérieur », et le poète se charge de le transformer en émerveillement intérieur. Il faut reconnaître qu'il n'y réussit pas souvent, car les traités d'astronomie rédigés sous forme lyrique en douze chants ne communiquent guère le frisson. C'est la raison pour laquelle le genre de la poésie didactique, qui a fleuri tout au long des siècles et se perpétue aujourd'hui encore de façon plus ou moins déguisée chez certains écrivains, est aujourd'hui mal-aimé. À mon sens, il mérite d'être partiellement réhabilité, ne serait-ce que parce qu'il donne un juste reflet de l'intégration des connaissances scientifiques dans la culture à une époque donnée, et fournit donc une précieuse source d'informations trop souvent négligée par les historiens des sciences.

Il existe aussi une poésie inspirée au sens fort du terme, inspirée par les thèmes de l'espace, du cosmos, de l'Univers, bref une poésie qui invente le monde et qui, par son intuition, peut rejoindre la quête du savant. Ces poètes-là, je les appelle des *rêveurs d'univers*. Leur poésie veut être la représentation la plus étendue et la plus intense de « cette réalité constamment vivante, constamment changeante, aux diverses parties liées intimement et qui se pénètrent mutuellement » (Henri Poincaré). Le rêveur d'univers, riche de son acquis en tous les domaines du savoir, riche aussi de ses lacunes et de ses doutes, de son intuition étrangement devineresse, se crée une compréhension équilibrée et synthétique du monde. Il pèse et il pense les matériaux du monde que lui apportent les sciences et les complète d'intuition, il en trouve les secrètes résonances unitaires. Les abîmes de grandeur et de petitesse que le télescope et le microscope dévoilent, l'harmonie cachée des lois naturelles, la vie renaissante et diverse, voilà des thèmes dignes de tenter les poètes. Outre ces thèmes universels, d'autres directement issus de la science astronomique orientent l'inspiration des poètes et écrivains. Jadis, ils ont rêvé sur l'attraction universelle, la nébuleuse primitive ; aujourd'hui, la mécanique quantique, le Big Bang, les trous noirs, la conquête spatiale ouvrent de nouveaux champs poétiques.

Il est remarquable de constater que les deux genres dont je viens de parler en termes très généraux ont été fondés par un seul et même poète, l'un des pères mythiques de toute la littérature occidentale. Il s'agit d'Hésiode. Dès le VIII^e siècle av. J.-C., Hésiode a en effet composé *Les Travaux et les Jours*, traité plein de conseils didactiques sur l'agriculture fondé en partie sur l'observation astronomique et météorologique (procédé qui sera notamment repris par Virgile dans

ses célèbres *Géorgiques*). Hésiode est d'autre part l'auteur de la *Théogonie*, où cette fois il use de son intuition poétique et de son expérience intérieure pour « inventer » l'origine du monde, en donner sa propre version. Je rappelle que dans ce texte célèbre, Hésiode fait naître toute chose du vide, anticipant en quelque sorte de près de trois mille ans sur la cosmologie quantique (anticipation certes très vague et confuse, mais anticipation quand même !)

Je propose ici un parcours très incomplet dans le jardin de la poésie astronomique appartenant aux deux genres – le genre didactique et le genre visionnaire. Je ne rendrai nullement justice à la richesse du jardin. Vous ne lirez ni Lucrèce, ni Victor Hugo, ni Leconte de Lisle, ni André Chénier, ni Jules Supervielle et bien d'autres, qui sont pourtant des maîtres du genre.

La poésie astronomique didactique a commencé avec la description du firmament. Le premier catalogue d'étoiles qui nous soit conservé a été composé vers l'an 368 avant notre ère par le Grec Eudoxe, célèbre astronome disciple de Platon et inventeur d'un système du monde fondé sur la perfection des sphères. *La Sphère* d'Eudoxe a été mise en vers grecs par Aratus, poète savant qui vivait en Cilicie environ 300 ans av. J.-C. Aratus énumère les constellations célestes, donne leur position respective, indique l'éclat plus ou moins grand de leurs étoiles.

Cassiopeë siège dans les hauteurs auprès de son propre mari ; elle brille même lorsque la lune respendit toute la nuit au ciel, mais elle est réduite et ornée de peu de flambeaux dans sa constellation. De même qu'une clef insinue ses dents de fer et ébranle les pènes d'une double porte verrouillée de l'intérieur, de même sont disposées ses étoiles. Quant à elle, le visage frémissant, elle étend les mains comme pour déplorer la perte d'Andromède, qui expie injustement les fautes de sa mère.

Extrait d'Aratus : *Les Phénomènes*.

C'est une poésie descriptive à peu près illisible aujourd'hui. Pourtant, *Les Phénomènes* eurent un immense succès. Aratus fut comparé à un nouveau Zeus qui avait rendu les étoiles plus brillantes. Cicéron et Germanicus César le traduisirent en latin, et d'innombrables éditions virent le jour, jusqu'à la Renaissance. Le plus grand astronome de l'Antiquité, Hipparque, qui vivait à Alexandrie au I^{er} siècle av. J.-C., tenait Aratus en haute estime et s'en inspira pour bâtir son propre catalogue d'étoiles. L'original d'Eudoxe avait sans doute connu peu d'éditions et ne s'était guère propagé. Avec *Les Phénomènes* d'Aratus on a donc l'extraordinaire exemple d'une œuvre scientifique – celle d'Eudoxe – qui n'a pu se perpétuer au cours des siècles que grâce à un texte de « vulgarisation » versifié !

Quittons le firmament et abordons la cosmologie, c'est-à-dire la

science de l'Univers considéré comme un tout, qui traite notamment de son origine, de sa forme et de son évolution. J'ai dit plus haut que les véritables poètes ne pouvaient être indifférents aux changements de vision du monde. Chaque révolution scientifique a ainsi engendré chez les poètes et artistes une abondante production. *Grosso modo* on peut dire qu'il y a ceux qui refusent parce qu'ils sont trop attachés à d'anciennes valeurs, il y a ceux qui doutent et s'interrogent, et il y a ceux qui suivent avec enthousiasme.

Un exemple de refus est donné par Guillaume Salluste Du Bartas. En 1579, il publie *La Sepmaine*, qui connut un retentissement extraordinaire. Or Du Bartas prend à partie ceux qui, à la suite de Copernic (qu'il appelle le « docte Germain » alors que Copernic était polonais), soutiennent que c'est la Terre qui tourne sur elle-même et non pas le ciel et l'ensemble des astres qui tournent autour d'elle. Il raille notamment l'argument de la relativité du mouvement, en prenant l'exemple d'un navire qui quitte le port. Les mêmes qui prétendent que, contrairement aux apparences, c'est la Terre qui tourne et le ciel qui est immobile, pourraient tout autant affirmer que c'est le navire qui reste fixe et le rivage qui se met à bouger. Ce que Du Bartas ne soupçonne pas, c'est que cette idée de relativité du mouvement donnera naissance cinquante ans plus tard à toute la physique galiléenne.

Chez certains, le changement de vision du monde proposé par les astronomes suscite aussi une interrogation inquiète. Le XVI^e siècle a vu le passage du monde clos à l'univers infini. Dans ce dernier, l'individu perd tout repère, et cette inquiétude se retrouve par exemple chez Pascal et chez le poète anglais John Donne, dans son admirable « First Anniversarie » (1611), longue méditation métaphysique sur l'harmonie détruite et l'absurdité de l'Univers.

Chez d'autres, les nouvelles hypothèses scientifiques suscitent une acceptation enthousiaste. À cet égard, nul savant n'a plus été chanté que Newton. C'est lui qui a ouvert de nouveaux horizons cosmologiques en imposant l'idée d'un espace infini et d'un temps éternel au sein duquel les corps célestes se meuvent en étant soumis à une loi suprême, celle de l'attraction universelle. Son influence scientifique et culturelle sera prépondérante jusqu'au début du XX^e siècle. Newton est par exemple le héros explicite de *L'Atlantiade, ou La Théogonie newtonienne* de Népomucène Lemer cier (1812), et des *Poèmes à travers l'infini* de Marc Bonnefoy (1894). Peu après sa mort, c'est le plus célèbre poète anglais de l'époque, James Thomson, connu pour avoir composé *Les Saisons*, qui a été chargé de composer l'épithaphe du savant. Dans « À la mémoire de Sir Isaac Newton », Thomson évoque l'âme du savant traversant pour la dernière fois les cieux conquis d'un vol tranquille, et transformant en soleil chaque

astre qu'il effleure.

Quant à la révolution relativiste, elle a engendré chez les écrivains des réactions mitigées (le temps d'« assimilation culturelle » d'une théorie compliquée étant sans doute plus long). Parmi eux figure un sceptique narquois nommé Marinetti, promoteur du futurisme. Dans un texte de 1912, « Les licous du temps et de l'espace », il tourne en dérision les nouvelles conceptions sur la relativité de l'espace et du temps énoncées par Einstein en 1905.

Chez les rêveurs d'univers, l'intuition poétique peut rejoindre celle du savant, et parfois l'anticiper de façon surprenante. Un exemple frappant concerne l'explication du noir de la nuit.

L'obscurité nocturne cache un véritable mystère impliquant le cosmos tout entier, son extension et son histoire. C'est le « paradoxe de la nuit noire ». Les astronomes ont longtemps cru que l'espace était infini, éternel et uniformément rempli d'astres. Mais alors, en quelque direction que l'on observe, notre regard devrait finir par rencontrer une étoile sur sa ligne de visée. Autrement dit, le fond du ciel devrait être comme une tapisserie radieuse continûment composée d'étoiles, ne laissant aucune place au noir. Pourquoi n'en est-il pas ainsi ? La question, posée dès le XVII^e siècle par l'astronome allemand Kepler, souleva des dizaines d'explications et de modèles. C'est le poète et écrivain américain Edgar Poe qui fournit en 1848 la première réponse satisfaisante. Dans un texte prémonitoire intitulé *Eurêka*, Poe affirme que le noir de la nuit repose sur la *finitude du temps*. En effet, la lumière ne se propage qu'à vitesse finie. Or, dans un univers temporellement fini, les étoiles n'ont pas toujours existé. Nous ne pouvons donc recevoir leur lumière que si celle-ci a eu le temps de nous atteindre, c'est-à-dire si les étoiles qui l'ont émise sont suffisamment proches. Ainsi, le ciel n'est pas uniformément brillant parce que les étoiles (pas nécessairement l'Univers tout entier) n'existent que depuis un temps fini.

Il n'y a pas d'erreur astronomique plus insoutenable, et il n'y en a pas qui ait obtenu une plus opiniâtre adhésion que celle qui consiste à se figurer l'Univers sidéral comme illimité. Il me semble que les raisons qui nous le font croire limité, telles que je les ai énoncées a priori, sont irréfutables ; mais, pour n'en plus parler, l'observation seule nous montre qu'il y a, dans de nombreuses directions autour de nous, si ce n'est dans toutes, une limite positive ou, tout au moins, elle ne nous fournit aucun motif pour penser autrement. Si la succession des étoiles était illimitée, l'arrière-plan du ciel nous offrirait une luminosité uniforme, comme celle déployée par la Galaxie, puisqu'il n'y aurait absolument aucun point, dans tout cet arrière-plan, où n'existât une étoile. Donc, dans de telles conditions, la seule manière de rendre compte des vides que trouvent nos télescopes dans d'innombrables directions est de supposer cet arrière-plan invisible placé à

une distance si prodigieuse qu'aucun rayon n'ait jamais pu parvenir jusqu'à nous. Qu'il en puisse être ainsi, qui oserait s'aviser de le nier ?

Extrait d'Edgar Poe : *Eurêka*.

Notons que ce texte ne se présente pas sous la forme classique d'un poème, mais d'un essai. Or voici ce que Poe dit dans sa préface d'*Eurêka* : « C'est simplement comme Poème que je désire que cet ouvrage soit jugé, alors que je ne serai plus. » Puis, dans une lettre de février 1848 : « Ce que j'ai exposé révolutionnera (avec le temps) le monde de la science physique et métaphysique. Je le dis avec calme, mais je le dis ! »

Sur ce point, Poe avait preuve de quelque mégalomanie. Les savants ne s'inspirent jamais des poètes pour élaborer leurs théories, et ce n'est qu'*a posteriori* que l'on s'aperçoit que parfois, le poète a précédé le savant.

Au milieu de notre siècle, Francis Ponge publie un curieux texte destiné à l'origine à des ingénieurs de la compagnie d'électricité. Intitulé simplement *Texte sur l'électricité*, Ponge se débarrasse en quelques lignes de son sujet pour livrer un véritable Manifeste de la poésie scientifique. Pour lui, de nouvelles déesses nommées Années-Lumière, Onde, ou Énergie sont nées de l'ingéniosité humaine. Génératrices de vertige, elles indiquent au poète de nouveaux champs d'exploration. Mais, avec l'humour qui le caractérise, Ponge suggère que cela ne sera pas facile.

Nous voici revenus à un temps tout pareil à celui des Cyclopes, bien au-delà de la Grèce classique, bien au-delà de Thalès et d'Euclide, et presque au temps du Chaos. Les grandes déesses à nouveau sont assises, suscitées par l'homme sans doute, mais il ne les conçoit qu'avec terreur. Elles s'appellent Angström, Année-Lumière, Noyau, Fréquence, Onde, Énergie, Fonction-Psi, Incertitude. Elles aussi, comme les divinités sumériennes, stagnent dans une formidable inertie mais leur approche donne le vertige. Et sur leurs tabliers sont inscrites les formules, en écriture abstraite, en hautes maths.

Ainsi formerons-nous un jour peut-être les nouvelles Figures, qui nous permettront de nous confier à la Parole pour parcourir l'Espace courbe, l'Espace non euclidien.

Extrait de Francis Ponge : *Texte sur l'électricité*.

Nombre de poètes ont répondu, chacun à sa façon, à l'injonction de Ponge. Tel est le cas de Raymond Queneau et sa fameuse *Petite Cosmogonie portative* (1950). Je termine avec un exemple pris dans ce qui constitue l'achèvement scientifique et technologique sans doute le plus marquant de notre siècle : la conquête spatiale. Il serait intéressant de se demander si l'imaginaire des poètes a pu être bloqué

à partir du moment où l'homme a effectivement réalisé le rêve de voler dans l'espace. Depuis les missions Apollo, certains ont pu dire par exemple que la Lune n'était désormais plus qu'un gros tas de cailloux piétiné par quelques Américains, et avait donc perdu toute charge poétique. Finissons donc avec un poète pour qui l'âge interplanétaire a au contraire ouvert de nouvelles formes du rêve : Charles Dobzynski.

*Puissance de l'air lourd, musculature du métal dans le faisceau de la fusée attelée à la foudre, à l'araire des vents,
et trouant le tissu compact de l'étendue, l'opacité qui se contracte et sa déchirure s'étend*

*ramification d'éclats et d'explosions dans l'épiderme atmosphérique,
avez-vous entendu la stridence de l'astronef striant ce que l'on nommait dérisoirement*

*l'éther ? une immensité vivante et mouvante, un ondolement noir
où lentement la vie s'accroît et s'agglomère, spectrographie de tous les rêves, précipité de la mémoire,*

*oisellerie de flammes,
et l'air se fend comme une orange, et dans la trame qu'il défait,
ne laissant à sa foulure bleue ni trace de trépan ni fragment d'horizon foudroyé,*

l'astronef s'enfonce dans l'infini avec cet abandon tranquille du dormeur ou du noyé.

Dans cette mère du cosmos, indifférente à ce qui s'établit, mouvante en ses mucosités, tout occupée à nourrir son sommeil éternellement,

Voici l'astronef roulant le feu de sa torsade et la vitesse est son enfantement,

*clarté dans l'ombre, éclair dans la fumée,
Chair dans la chair et chaleur dans la glace : une vie au-delà du néant va germer.*

Extrait de Charles Dobzynski : *L'Opéra de l'Espace*.

Avec ce texte, la poésie et la technologie la plus ardue – celle des fusées – sont réconciliées, mais non sans ouvrir de nouvelles interrogations. Et c'est bien là la véritable recherche du poète, et de l'artiste en général, qui les rapprochent de la démarche du scientifique.

Cosmos et poésie¹

Les poètes et l'Univers

J'ai toujours été fasciné par le fonctionnement de l'imagination créatrice, qu'elle soit scientifique, littéraire, artistique ou philosophique. Mes recherches en physique théorique portent sur la cosmologie, la relativité générale, la nature et la forme de l'espace, les trous noirs. Or la cosmologie est le prototype même d'une construction mentale, dans laquelle l'imaginaire créateur se déploie presque sans limite. Analyser les diverses façons dont le cosmos a été imaginé à travers l'histoire, que ce soit par le biais de l'astronomie, des mathématiques, de la philosophie, de la religion, de la peinture, de la musique ou de la littérature, jette un éclairage passionnant sur une interrogation classique, mais que je formulerai de manière inverse. Non pas : « Quelle est la place de l'homme dans l'Univers ? », mais plutôt : « Quelle est la place de l'Univers dans l'homme ? » Autrement dit, comment l'homme forge-t-il ses images mentales du cosmos et quelle place ces représentations occupent-elles dans son imagination créatrice ?

J'ai particulièrement étudié le lien entre l'imaginaire cosmique dans la science et son homologue dans la poésie. Pendant plusieurs années, j'ai rassemblé une vaste collection de textes poétiques sur l'Univers. Un certain nombre de thèmes m'ont semblé particulièrement féconds pour l'imagination créatrice – par exemple, l'harmonie du monde, l'infini, la vie et la mort des étoiles, le sentiment d'appartenance ou d'exclusion que peut éprouver l'homme face à l'immensité du cosmos. Dans chacun de ces thèmes, j'ai tenté de retrouver les subtiles relations qui pouvaient se nouer ou se dénouer entre les approches scientifique et poétique.

Je ne livrerai ici que de très brefs aperçus sur la poésie cosmique, en me restreignant à des thèmes qui sont directement liés à mes recherches en astrophysique théorique, c'est-à-dire la modélisation cosmologique, l'évolution des étoiles et les trous noirs. En outre, puisque j'ai le plaisir de me trouver ici avec un certain nombre de confrères transalpins, j'accorderai une place particulière à la poésie de langue italienne.

Les modèles de cosmos

Les rapports entre les représentations scientifiques et poétiques du cosmos ont évolué au cours des siècles. Cette évolution a procédé par bonds successifs, liés aux grands changements de conceptions cosmologiques. L'histoire de la cosmologie en Occident a connu essentiellement quatre ruptures. La première remonte à la Grèce antique, au VI^e siècle avant notre ère, lorsque, avec Thalès, Anaximandre, Démocrite, suivis de Platon et Aristote, le discours logique a remplacé le discours mythique des Homère et autres Hésiode. La deuxième rupture est l'apparition de l'héliocentrisme au XVI^e siècle, avec Copernic, Galilée, Kepler. La troisième est le passage du monde clos conçu dans l'Antiquité à l'espace infini et à l'attraction universelle conçus par Newton, à la fin du XVII^e siècle. La quatrième et dernière est l'apparition des théories de la relativité et de l'espace-temps courbe par Einstein, au début du XX^e siècle, suivie peu après par la théorie de l'expansion de l'Univers et les modèles de Big Bang, forgés par Georges Lemaître en 1930.

Chacune de ces révolutions scientifiques a engendré une passionnante production poétique. Le tableau ci-dessous fait référence – de façon très sommaire – à quelques textes littéraires majeurs fécondés par ces changements de systèmes cosmologiques.

Arrêtons-nous un instant sur la révolution cosmologique du XVII^e siècle. Le monde clos de l'Antiquité, c'est-à-dire la conception d'un univers centré sur la Terre et contenu dans un enchâssement de sphères concentriques, était, en un certain sens, rassurant, car il procurait une « maison » à la mesure de l'homme.

C'est tout le sens de la cosmologie médiévale, synthèse entre la philosophie d'Aristote et la religion chrétienne, dans laquelle la sphère ultime qui clôturait le monde, celle des étoiles fixes, marquait en même temps l'entrée dans l'Empyrée, c'est-à-dire le royaume de Dieu, des saints et des élus. Autrement dit, c'était le Paradis accessible sans trop de difficultés aux âmes des défunts. Dante, dans sa *Divine Comédie*, décrit précisément le voyage du poète à travers les sphères célestes, et, par la bouche de son guide spirituel Béatrice, nous livre une véritable dissertation astronomique sur l'univers médiéval.

Révolution scientifique

Poésie cosmologique

1. Naissance de l'humanité : De la nature

Platões e Aristóteles

— Platon, Aristote

École de Chartres (Gossouin de Metz : *Imago Mundi*)

De l'Antiquité à l'Époque moderne

Cosmologie médiévale

Félimentris PleiÉdu (Publicités des Mères, Ronsard, Du Bartas, La Boderie)

Complete: John Donne, *Anatomy of the World*, 1611), John Milton (*Paradise Lost*, 1667)

Galilée G. (1610) no (Adone, 1623)

Asplettinefin Boisîn Stays, Ellysward Young (Nights, 1742)

Albert Camus (1913-1959) - Paul (Rêve de l'univers, 1820), Klopstock (La Messiade, 1789)

Italie : Leopardi (Canzoni, 1818)

Réalistes : Marinetti, Khlebnikov (1912)

Einstein (1879-1955) - La lumière sur l'électricité, 1962)

Raymond Queneau (1895-1966) - Cosmogonie portative, 1950)

Henri Michaux (1901-1985) - Le Dépouillement par l'espace, 1966)

L'univers infini, au contraire, peut engendrer angoisse et terreur, dans la mesure où l'individu, dans un espace n'ayant plus ni centre ni bord, perd tout repère. En témoigne la célèbre pensée de Pascal : « Le silence éternel des espaces infinis m'effraie. » Un exemple méconnu de l'inquiétude suscitée par ce changement de vision du monde est fourni par le grand poète anglais John Donne, qui vécut de 1572 à 1631. En 1610, la jeune Élisabeth Drury meurt à l'âge de 15 ans. Un an plus tard, Donne rédige « First Anniversarie », prétexte à une longue méditation métaphysique sur la mort et sur l'absurdité de l'Univers. Pour le poète, le monde a perdu toute signification. La jeune Élisabeth lui en donnait une, mais elle est morte. Les anciennes cosmologies d'Aristote ou de Ptolémée lui donnaient aussi un sens, mais elles aussi sont mortes depuis que Copernic, Kepler, Galilée ont imposé un nouveau système du monde brisant l'harmonie du monde antique. En 1572, année de naissance de John Donne, une étoile nouvelle est apparue dans les cieux, renversant le dogme aristotélicien de l'immutabilité des étoiles fixes. En 1610, l'année de la mort d'Élisabeth Drury, Galilée a braqué une lunette vers le ciel, il a découvert l'imperfection de la Lune et du Soleil, il a vu les phases de Vénus et les satellites de Jupiter.

Bref, rien ne sera plus comme avant, et John Donne chante magnifiquement son désespoir devant l'harmonie perdue :

*Comme la terre
Le soleil est perdu, et l'esprit de nul homme
Ne peut nous indiquer où l'on peut les trouver.
Et c'est bien confesser que ce monde est usé
Que de chercher au ciel et parmi les planètes*

*Tant de mondes nouveaux : on voit que celui-ci
S'émiette et, retournant à l'état des atomes,
Vole en éclats, toute cohérence abolie,
Toute juste mesure et toute relation.*

*Telle est la condition de ce monde à présent
Et Elle qui devait en unir les parties,
Qui seule possédait la force magnétique
Capable en les joignant de les souder ensemble ;
Elle, le meilleur, le premier original
De toutes les copies ; elle, l'universel
Régisseur du destin, dont les yeux et le sein
Doraient l'Inde de l'Ouest et parfumait l'Orient ;
Elle dont l'univers est une dépendance,
Elle est morte, oui morte, et quand tu la sais morte,*

Tu sais l'infirmité de ce monde qui boîte.

*Car la beauté du monde est flétrie ou perdue,
Beauté née des couleurs et justes proportions.
Dans les cieus nous pensons que la forme pure est ruinée.*

*Le firmament se divise en quarante-huit parties ;
Dans ces constellations des étoiles nouvelles
Surgissent, d'anciennes disparaissent : on dirait
qu'au ciel même, tremblement de terre, guerre ou paix,
Où s'effondre l'ancien, se bâtit le nouveau.*

Le poète napolitain Giambattista Marino, dit le Cavalier (1569-1625), est moins inquiet. Son immense poème *Adone* (1623), foisonnant et somptueux, est l'un des sommets de la littérature baroque. Parfaitement au courant des discussions de son temps sur la nature des cieus, Marino opte, en vertu d'une préférence esthétique, pour un cosmos sphérique, fini, solide, centré sur la Terre. Pourtant, le même poème glorifie les nouvelles terres du ciel découvertes par Galilée, qui le rapprochent d'un Christophe Colomb. Marino, à l'imagination plastique raffinée, pousse très loin la vision du cosmos sous l'aspect d'un engrenage. Non seulement il multiplie les analogies de cet ordre : l'horloge, l'orgue, mais il nous montre une copie de la machine céleste réalisée dans les substances terrestres les plus pures et brillantes. À cette époque, le goût était vif pour les sphères astronomiques, dont on faisait de précieux objets d'art. Toute l'Europe parlait des sphères de cuivre de Tycho Brahe, et Kepler avait conçu l'idée de faire fabriquer pour le duc de Wurtemberg une coupe cosmique en argent et pierres précieuses, reproduisant en miniature le modèle de l'Univers.

*Là se taisant, du courbe escalier dont les arcs
Se déploient du milieu de la cour elle foule
Les degrés ivoirins, qu'on gravit et descend,
Et avec Adonis parvient jusqu'à leur faite.*

*Là une salle immense, à travers cent fenêtres
De limpide cristal, prend la lumière du jour
Et dans un beau décor de fines mosaïques
Elle contient la figure de l'univers.*

Passons maintenant à la plus récente des révolutions cosmologiques. Albert Einstein expose ses nouvelles conceptions sur la relativité de l'espace et du temps en 1905. Dix ans plus tard, sa théorie de la relativité générale propose une vision radicalement nouvelle de l'univers, en termes d'un espace-temps élastique, tissé par la lumière, courbé par la matière.

L'univers relativiste a influencé les poètes. Parmi eux, Filippo Tommaso Marinetti. Ce Franco-Italien parfaitement bilingue est le promoteur du premier mouvement d'avant-garde du XX^e siècle : le

futurisme, dont il rédige le manifeste. Son poème « Les licous du temps et de l'espace » date de 1912. Marinetti reprend à son compte, mais de façon très impertinente, l'élasticité des distances et des durées prônée par la théorie einsteinienne.

*Ô Temps, je vais foncer sur toi,
et te casser les ailes,
et te couper ta voix asthmatique d'horloge !
Tu as beau appeler à la rescousse
L'Espace, vieux vautour podagreux
qui bave le ruban blanc des routes
et les grands arcs de l'horizon,
semblables à d'immenses limaces arrondies !...
Temps ! Espace !
Seules divinités qui maîtrisez le monde !...
Je me révolte contre vous !
[...]
Temps ! Espace ! Que diriez-vous
si brusquement je traversais,
en dix secondes,
l'intervalle qui me sépare
de ce rond horizon,
car d'après vos calculs
il ne m'attend que dans une heure ?...
Ah ! Ah ! vous riez jaune,
et vous sentez trembler
sous vos pieds géométriques,
les piédestaux de votre puissance millénaire !
C'est que, je vous l'avoue cordialement,
mon moteur a parfois des vitesses étonnantes !...
Vous savez d'autre part que tous les kilomètres
ne sont pas aussi longs les uns que les autres.
Les uns ont trois cents mètres et les autres huit cents.
Il y a des heures qui s'élancent
et d'autres qui s'endorment...
Tout cela manque d'ordre et de précision !...
Sachez donc qu'un esprit aussi fort que le mien
peut donner à une heure l'ampleur d'une semaine,
ou la serrer dans son poing dur
comme un citron,
dont coulera seulement
le jus d'un tout petit quart d'heure !...*

D'autres grands textes que l'on peut qualifier de « relativistes » sont dus à Henri Michaux et Raymond Queneau. « Le dépouillement par l'espace », de Michaux, datant de 1966, nous rappelle que le véritable espace des voyageurs est intérieur. Dans l'espace du dedans, il y a autant de gouffres et de lumières lointaines que dans l'espace du dehors, et de quoi s'y perdre en dérives infinies. Grâce à des substances psychotropes, la quête de l'espace devient conquête de soi. Michaux « entre en espace » comme un nageur pénètre l'océan, et l'être, ainsi espacifié, épouse le mouvement de l'espace lui-même : l'expansion infinie, décrite par les modèles scientifiques du Big Bang.

Simultanément, j'étais dans une expansion extraordinaire. L'espace m'espaciait...

De quantité d'autres façons encore, il me venait. L'espace était partout.

Dans une sorte de nausée devenue délices, je voguais, balancé sous les étoiles, lointaines et mouvantes, semblables par moments aux feux de navires que de nuit l'on voit au loin tanguant sur la mer houleuse, feux qui ici eussent été ceux de navires galactiques naviguant sur l'océan du sans-bornes. Cet océan était en tous sens, et seul comptait.

L'espace était permanent. Il n'était pas invariant. Même il variait constamment. Pendant longtemps il fut en augmentation. Des espaces au-delà de cet espace se formaient nouvellement, espaces qui après quelque temps en engendraient d'autres, et encore d'autres, de façon que chaque nouvelle nature d'espace défaisait le précédent, lui soustrayant encore un je ne sais quoi, pour le rendre plus immatériellement espace, espace purifié.

Espace au-delà de tout. Contemplation.

Raymond Queneau, lui, est connu pour son recueil *Cent Mille Milliards de poèmes* dans lequel il exploite toutes les combinaisons et permutations possibles de mots pour engendrer un nombre presque infini de trajectoires poétiques. Sa *Petite Cosmogonie portable*, datant de 1950, est un récit du monde depuis les origines jusqu'à nos jours. Ce petit bijou est probablement le premier texte poétique intégrant la théorie de l'atome primitif que l'abbé Lemaître avait proposée en 1930 et dans laquelle, en se fondant sur les équations de la relativité d'Einstein, il décrivait scientifiquement la naissance de l'Univers sous forme d'une gigantesque explosion primordiale.

La naissance et la mort des mondes

C'est au XIX^e siècle seulement qu'a germé l'idée que les étoiles pouvaient naître, vivre et mourir. Il a fallu pour cela l'hypothèse de la nébuleuse primitive formulée par Laplace, qui explique la naissance du Soleil et des planètes, les découvertes de la spectroscopie et les premières photographies révélant les nébuleuses. Dans son *Astronomie populaire*, Flammarion salue en termes poétiques ces nébuleuses gazeuses, voyant en ces lueurs les berceaux et les tombes de la création.

Flammarion compare les points de condensation du brouillard cosmique à « ces petits nids soyeux d'insectes au flanc des branches ».

Cette comparaison poétique va frapper l'imagination de poètes. Par exemple Paul Claudel, dans son ode « La maison fermée » :

Ô capture ! ô pêche miraculeuse ! ô million d'étoiles prises aux mailles

de notre filet,

Comme un grand butin de poissons à demi sorti de la mer dont les écailles vivent à la lueur de la torche !

Comme on voit les petites araignées ou certaines larves d'insectes comme des pierres précieuses bien cachées dans leur bourse d'ouate et de satin,

C'est ainsi que l'on m'a montré toute une nichée de soleils encore embarrassés aux froids plis de la nébuleuse.

Jules Laforgue a une vision beaucoup plus pessimiste. Il rédige avant d'avoir 20 ans des poèmes de désespoir face à l'ampleur du spectacle cosmique – car pour lui, chaque monde nouveau découvert par les télescopes est un monde de souffrances. « Le sanglot universel » date de 1880. Le poète se suicidera un an après.

*Je tends mes poignets universels dont aucun
N'est le droit ou le gauche, et l'Espace, dans un
Va-et-vient giratoire, y détrame les toiles
D'azur pleines de cocons à fœtus d'Étoiles.*

*Ah ! la Terre n'est pas seule à hurler, perdue !
Depuis l'Éternité combien d'astres ont lui,
Qui sanglotaient semés par l'immense étendue,
Dont nul ne se souvient ! Et combien aujourd'hui !*

*Tous du même limon sont pétris, tous sont frères,
Et tous sont habités, ou le seront un jour,
Et comme nous, devant la vie et ses misères
Tous désespérément clament vers le ciel sourd.*

Si les astres naissent, ils peuvent aussi mourir. Les apocalypses célestes sont un autre grand thème de la poésie cosmique. Je prendrai d'abord pour exemple un poète italien : Giovanni Pascoli (1855-1912). Son cas est intéressant. Son père avait été assassiné par vengeance alors qu'il était enfant, et il a passé sa jeunesse à redouter le même sort. Il a développé ainsi le sens de la précarité de la vie. Devenu professeur de littérature, il a publié deux recueils contenant des poèmes cosmiques reflétant son angoisse devant la mort des mondes. Le plus important d'entre eux, datant de 1903, s'intitule *Il Ciocco* (La souche).

Au cours d'une veillée dans une maison campagnarde de Toscane, Pascoli a été témoin d'une sorte de Big Crunch en miniature : l'énorme souche qui flambait dans la cheminée abritait un peuple de fourmis, dont elle était l'univers. Les hommes assis autour du feu sont comme des dieux, ignorant le désastre qu'ils provoquent dans l'univers des fourmis, et les fourmis mourantes ignorent la présence des dieux. Devant cette panique sans espoir, Pascoli prolonge sa méditation sur le plan cosmique. Dans son rapport au cosmos, c'est l'homme qui devient

fourmi.

*La, dove i mondi sembrano con lenti
Passi, come concorde immensa mandria
Pascere il fior dell'etere pian piano,
Beati della eternità serena,
Pieno è di crolli, e per le vie, battute
Da stelle in fuga, come rossa nube
Fuma la densa polvere del cielo,
E une mischia incessante arde tra il fumo
Delle rovine, come se Titani
Aeriformi, agli angoli del Cosmo
L'un l'altro ardendo di ferir, lo spazio
Fendessero con grandi astri divelti.*

*[Là ou les mondes semblent à pas lents,
Comme un immense troupeau en bon accord,
Paître tout doucement la fleur de l'éther,
Heureux de leur éternité sereine,
Il est plein d'écroulements, et sur les routes battues
Par des étoiles en fuite, comme une nuée rouge,
Monte la poussière dense du ciel,
Et une mêlée incessante brûle dans la fumée
Des ruines, comme si des Titans
Aux formes aériennes, postés aux angles du Cosmos,
Brûlant de se frapper l'un l'autre, fendaient
L'espace avec de grands astres arrachés.]*

Le trou noir

Passons au trou noir. Dans notre imaginaire, il y a le chaos de dissolution, sans régénération possible, qui nous renvoie évidemment au sentiment de la mort irrémédiable. La hantise de la chute dans un abîme sans fond est l'un des cauchemars les plus naturels de l'homme. L'abîme n'est pas seulement celui de l'espace. Les poètes savent bien que c'est en eux-mêmes qu'ils tombent.

Auteur d'études sur les mythes, le poète italien Arturo Graf (1848-1913) sait par exemple que ses visions cosmiques sont des symboles de vie intérieure. Il sait que le maelström est en lui :

*Dentro l'anima mia, dove ruina
Il fondo é il cieco abisso si spalanca...*

*[À l'intérieur de mon âme, où le fond croule
Et l'aveugle abîme s'ouvre tout grand...]*

Toute une pléiade de poètes a exprimé la même aspiration vers le néant. William Blake (*The Book of Los*) décrit une chute vertigineuse, de même que John Milton (*Paradise Lost*) et Victor Hugo (« La Fin de Satan »). Pascoli voit le ciel ouvert au-dessous de lui et craint de tomber dans cet abîme où, tout au fond, brille l'étoile Vége :

*Veder d'attimo in attimo più chiare
Le costellazioni*

*Precipitare languido, sgomento,
Nullo, senza più peso e senza senso :
Sprofondar d'un millenio ogni momento !
Non trovar fondo, non trovar mai posa...*

*[Voir d'instant en instant plus claires
Les constellations...
Être précipité, défaillant, égaré,
Anéanti, sans plus de poids, sans rien sentir,
Sombre d'un millénaire à chaque instant,
Ne pas trouver de fond, ni de repos.]*

La Vertigine, Nuovi Poemetti, 1909.

Je terminerai avec un poète français qui a particulièrement exploré le thème de l'abîme. C'est Gérard de Nerval, le plus tourmenté des romantiques. Dans un poème de 1854 intitulé « Chimères », Nerval offre une description saisissante de la spirale tourbillonnante de matière, d'espace et de temps qui s'engouffre à tout jamais au fond du néant. Un néant que, cent ans plus tard, les astronomes appellent *trou noir*.

*En cherchant l'œil de Dieu, je n'ai vu qu'un orbite
Vaste, noir et sans fond, d'où la nuit qui l'habite
Rayonne sur le monde et s'épaissit toujours ;*

*Un arc-en-ciel étrange entoure ce puits sombre,
Seuil de l'ancien chaos dont le néant est l'ombre,
Spirale engloutissant les Mondes et les Jours !*

Il s'agit là d'une littérature de visionnaire. La notion scientifique de trou noir dévoreur de matière n'a fait son apparition que dans la seconde moitié de notre siècle. À la fin des années 1970, j'ai réalisé des simulations d'ordinateur pour calculer l'aspect d'un trou noir entouré d'un disque de gaz². Or nulle légende n'eût pu mieux convenir à cette image « virtuelle » du trou noir que les strophes de Nerval (que je ne connaissais pas à l'époque). On ne peut qu'être fasciné par la façon dont l'intuition du poète a anticipé celle du scientifique.

En conclusion, je dirai que c'est là sans doute la leçon la plus riche à retirer de l'étude des rapports entre cosmos et poésie : la force de l'intuition. Cette force divinatrice se trouve dans le fameux poème en prose d'Edgar Allan Poe, *Eurêka* (1848), dans lequel il donne la première explication correcte du noir de la nuit, il entrevoit la théorie du chaos et les modèles de Big Bang :

*Si je m'avise de déplacer, ne fût-ce que de la trillionième partie d'un
pouce, le grain microscopique de poussière posé maintenant sur le bout de
mon doigt... j'ai accompli un acte qui ébranle la lune dans sa marche, qui
contraint le soleil à n'être plus le soleil, et qui altère pour toujours la
destinée des innombrables myriades d'étoiles.*

[...]

Si la succession des étoiles était illimitée, l'arrière-plan du ciel nous offrirait une luminosité uniforme, comme celle déployée par la Galaxie, puisqu'il n'y aurait absolument aucun point, dans tout cet arrière-plan, où n'existât une étoile. Donc, dans de telles conditions, la seule manière de rendre compte des vides que trouvent nos télescopes dans d'innombrables directions est de supposer cet arrière-plan invisible placé à une distance si prodigieuse qu'aucun rayon n'ait jamais pu parvenir jusqu'à nous. Qu'il en puisse être ainsi, qui oserait s'aviser de le nier ?

1- Conférence donnée en février 1997 à Venise (Italie), lors de la 9th Venice Conference on Cosmology & Philosophy.

2- [Voir l'image.](#)

L'image de l'origine à travers science et littérature¹

On trouve chez tous les peuples, dans le fonds le plus ancien de leurs traditions, des récits relatifs à l'origine de la Terre et du ciel, c'est-à-dire des récits de cosmogonie. La plupart de ces traditions recherchent un principe créateur à la source de toute chose : Dieu(x), idée ou élément. Comment la perfection première a-t-elle produit le continuum spatio-temporel, comment le parfait, l'éternel et l'incorrupible ont-ils engendré l'imparfait, le changeant, le corruptible ? Aucun sujet n'a plus agité l'imagination humaine. L'origine de toutes choses est le mystère des mystères, et toute civilisation a tenté de trouver une explication.

En Europe, plus exactement dans le bassin méditerranéen, les premières sources littéraires grecques placent l'origine dans l'Eau. Ainsi Homère, dans l'*Iliade*, affirme que l'Océan est le père de tout. La *Théogonie* d'Hésiode (VIII^e siècle) est déjà plus complexe, car elle fait une première synthèse de traditions plus anciennes. Son récit de procréation sexuelle entre les forces cosmiques et des batailles entre géants fut extrêmement populaire. Hésiode use de son intuition poétique et de son expérience intérieure pour « inventer » l'origine du monde à partir du vide :

Donc, avant tout, fut le Vide ; puis Terre aux larges flancs, assise sûre à jamais offerte à tous les vivants, et Amour, le plus beau parmi les dieux immortels, celui qui rompt les membres et qui, dans la poitrine de tout dieu comme de tout homme, dompte le cœur et le sage vouloir. Du Vide naquirent Érèbe et la noire Nuit. Et de Nuit, à son tour, sortirent Éther et Lumière du Jour. Terre, elle, d'abord enfanta un être égal à elle-même ; capable de la couvrir tout entière, Ciel Étoilé, qui devait offrir aux dieux bienheureux une assise sûre à jamais.

Il est intéressant de noter que trois mille ans plus tard, la cosmologie quantique, qui est la forme actuellement la plus élaborée de la cosmogonie scientifique, fondée sur les théories de la relativité générale et de la physique quantique, met en équations le

surissement spontané de l'Univers à partir des fluctuations du Vide.

Dans le *Timée*, Platon présente une déité (« grand architecte de toutes choses ») donnant une extension physique à une idée :

Lorsque Dieu entreprit d'ordonner le tout, au début, le feu, l'eau, la terre et l'air portaient des traces de leur propre nature, mais ils étaient tout à fait dans l'état où tout se trouve naturellement en l'absence de Dieu. C'est dans cet état qu'il les prit, et il commença par leur donner une configuration distincte au moyen des idées et des nombres. Qu'il les ait tirés de leur désordre pour les assembler de la manière la plus belle et la meilleure possible, c'est là le principe qui doit nous guider constamment dans toute notre exposition.

Le monde créé étant ordonné, il est logique de décrire l'état du monde antérieur à la création par un terme synonyme de désordre et confusion. C'est le chaos (ou tohu-bohu dans la tradition hébraïque), invoqué pendant deux millénaires de littérature cosmogonique. Les célèbres *Métamorphoses* d'Ovide, poème latin en quinze livres et quatorze mille vers, regroupent divers récits de la mythologie grecque et consacrent leur *Livre Premier* aux origines du monde, sorti du chaos :

Avant la mer, la terre et le ciel qui couvre tout, la nature, dans l'univers entier, offrait un seul et même aspect ; on l'a appelé le chaos ; ce n'était qu'une masse informe et confuse, un bloc inerte, un entassement d'éléments mal unis et discordants.

En Occident, le témoignage suprême sur la création réside dans les Écritures de la tradition judéo-chrétienne.

Dieu a créé toutes choses selon le Nombre le Poids et la Mesure,

est-il écrit dans le Livre de la Sagesse de Salomon.

Je rappelle que la Genèse découpe la création en sept jours. Le premier jour, Dieu crée la matière et la lumière à partir du Chaos ; le deuxième, il crée l'espace par séparation du ciel et des eaux ; le troisième, il sépare la terre et les eaux ; le quatrième, il crée les luminaires célestes, le cinquième, les poissons et les oiseaux, le sixième les animaux terriens et l'homme ; enfin au septième jour, Dieu se repose et contemple son œuvre.

D'une incroyable puissance d'envoûtement, la Genèse va longtemps façonner l'imagination des penseurs : philosophes, savants, artistes, écrivains et poètes occidentaux. Au Moyen Âge, la littérature

cosmogonique ne s'écarte pas d'un iota des Évangiles. Les bibles et autres encyclopédies médiévales magnifiquement enluminées racontent de façon saisissante l'ordre de la création biblique. Citons par exemple le *Missel et heures à l'usage des frères mineurs* (XIV^e), le *Livre des sept âges du monde*, manuscrit exécuté à Mons vers 1460 (qui se trouve à Bruxelles, Bibliothèque royale Albert I^{er}), et le célèbre *Livre de la propriété des choses* de Barthélemy l'Anglais, où l'on voit Dieu créer les étoiles muni d'un compas.

Les aspects théologiques de la cosmologie médiévale dérivent en grande partie des traités de l'*Hexaméron*. Ces commentaires de la Genèse constituent un genre continu de littérature théologique remontant aux Pères de l'Église. Une autre partie importante de la tradition se trouve dans les quatre tomes des *Sentences* de Pierre Lombard (vers 1150) qui servira de texte de base en théologie pendant cinq siècles. Dans le second livre, les *Sentences* exposent aux étudiants en théologie les problèmes de la création tels qu'ils sont décrits dans la Genèse.

Certaines questions, encore aujourd'hui posées aux conférenciers qui parlent de la création de l'Univers dans le cadre de la théorie du Big Bang, ont reçu au Moyen Âge, des réponses encore valables aujourd'hui, bien que dans un contexte différent. Je pense notamment aux questions : « Dans quoi l'Univers se dilate-t-il ? » ou bien : « Qu'est-ce qu'il y avait avant le Big Bang ? »

Écoutons la réponse d'Amboise de Milan (*Hexameron*) :

C'est au commencement du temps que Dieu a créé le Ciel et la Terre. Car le temps existe depuis qu'existe ce Monde, il n'existait pas avant le Monde.

Mieux, celle de Guillaume d'Auvergne (*De Universo*) :

De même que le Monde n'a pas de dehors, n'a pas d'au-delà, puisqu'il contient et embrasse toute chose, de même le temps, qui a commencé à la création du Monde, n'a pas d'auparavant ni de précédemment, puisqu'il contient en lui tous les temps qui sont ses parties.

Celui qui pose cette question : avant le commencement du temps, y a-t-il eu quelque chose ? alors que le mot avant implique l'idée de temps, fait exactement comme s'il demandait : dans le temps qui a précédé le commencement du temps, quelque chose a-t-il existé ?

Le terme même de création du monde est discuté avec une pertinence dont feraient bien de se souvenir nombre de cosmologistes ou de commentateurs d'aujourd'hui :

Le commencement du Monde par création n'est pas physique et ne peut être prouvé au niveau de la physique.

Albert le Grand, *Physica*.

La question de savoir si le Monde est éternel ou créé ne saurait être résolue par une démonstration décisive, et c'est un point où l'intelligence s'arrête.

Maimonide, *Le Guide des égarés*.

Enfin :

Que le Monde ait commencé est donc objet de foi, mais cela n'est pas démontrable, ni objet de science.

Saint Thomas d'Aquin, *Summa Theologica*.

J'arrête ici les citations. La transition entre Moyen Âge et Renaissance est symbolisée dans la *Chronique de Nuremberg*, conçue par Hartmann Schedel à Nuremberg en 1493. Il s'agit d'une vaste encyclopédie cosmographique décrivant les âges du monde, depuis sa création jusqu'au Jugement dernier, tous les détails de l'*Hexaméron* étant représentés jour après jour dans une remarquable série de bois gravés exécutés dans l'atelier de gravure où Albrecht Dürer était apprenti.

À la Renaissance, l'idée d'un syncrétisme entre les traditions religieuses et mythiques voit le jour. La Bible, Platon, Hésiode, Ovide, chacun de ces comptes rendus de la création est amalgamé aux autres pour produire un récit unique les embrassant tous. Le terme *Heptaméron* (de *hepta*, sept, et de *hêméra*, jour) n'est autre que la version grecque du mot *Semaine*, issu du latin. Il apparaît pour la première fois en 1559 dans un récit de Marguerite de Navarre. *La Semaine* (1578) de Guillaume Salluste Du Bartas est une adaptation épique de la Genèse. Dans le *Premier Jour*, Du Bartas décrit le chaos par des termes antinomiques, à la limite du calembour :

*Ce premier monde était une forme sans forme,
Une pile confuse, un mélange difforme,
D'abîmes un abîme, un corps mal compassé,
Un Chaos de Chaos, un tas mal entassé.*

L'*Heptaplus* de Pic de la Mirandole est aussi un exercice de ce type. Pic met en avant les platoniciens, péripatéticiens et les stoïciens en même temps que les Évangélistes et les Pères de l'Église et les cabalistes, et même Avicenne et Averroès. À la Renaissance, la création est en fait une métaphore du temps, une tentative pour rendre le paradoxe du temps intelligible à l'esprit des mortels.

Le génie littéraire de Milton nous offre dans son *Paradis perdu*

(1667) de sublimes aperçus sur le chaos. Les ténèbres sont la matière première qui se façonne en créations, quelque chose comme les ténèbres transformées en bêtes.

Première grande rupture entre science et religion, le XVIII^e siècle, qui marque le début du mécanisme et du rationalisme scientifiques. L'emprise judéo-chrétienne faiblit, mais la science des origines est encore trop balbutiante pour proposer autre chose qu'une date de création du monde conforme aux Écritures : 4004 av. J.-C. Un écrivain et un savant seront les premiers à remettre sérieusement en question le dogme. Benoît de Maillet, consul de France aux Indes et écrivain, auteur de *Telliamed*, affirme dès 1720 l'immense durée du temps de la Terre : plusieurs millions d'années. Le savant Buffon n'ose reculer aussi loin, mais dans sa *Théorie de la Terre* (1749), il fournit des preuves expérimentales : en mesurant le temps de refroidissement de boulets ferreux portés au rouge, il en déduit que notre globe terrestre doit dater de 72 832 ans (il était encore loin du compte, puisque l'âge de la Terre est estimé aujourd'hui à 4,56 milliards d'années).

La théorie de l'attraction newtonienne s'impose au XVIII^e siècle. Toutefois, des glissements se produisent quant à la question des origines. Le cadre de pensée newtonien est un espace illimité dans un temps éternel. Le problème de la genèse hante les esprits qui ne se contentent plus des Écritures, et cet univers incréé (sinon par l'action divine) que leur offre Newton ne peut les satisfaire. Non contents de revoir à la hausse l'âge de l'Univers, ils entrevoient des mécanismes de formation ; avec la perte du géocentrisme, la Terre, qui n'est plus ni centre ni sommet de la création, n'a plus de raison de naître avant toute chose. Les savants commencent à établir une nouvelle chronologie de la création : l'Univers d'abord, puis le Soleil, puis la Terre.

Buffon, par exemple, ne se contente pas de refaire la chronologie, il propose des mécanismes de naissance. Pour le système solaire, il attribue l'impulsion première au choc d'une comète qui, arrachant au Soleil des lambeaux en fusion, aurait projeté au loin les futures planètes, retenues enchaînées par l'attraction. Cette cosmogonie sera reprise au début du XX^e siècle par l'Anglais James Jeans, mais sans succès. Notons que l'antagonisme de deux forces – l'attractive et la répulsive – remet en honneur un très vieux mythe remontant à Héraclite (et largement présent dans les *Vedas*), celui de la grande pulsation. L'équilibre s'altère tour à tour au profit de chacune d'elles jusqu'à son triomphe total, suivi d'un renversement qui donnera l'avantage à sa rivale.

Vers le milieu du XVIII^e siècle, la conception d'un fluide élémentaire universel se généralise. Le philosophe Emmanuel Kant a le premier la grandiose vision d'un état premier de la matière emplissant

l'espace infini, et d'où naîtront les mondes. Plongée dans l'ombre et le silence, cette matière diffuse est déjà grosse de tous les futurs.

Relisons Diderot, dans sa *Lettre sur les aveugles* (1749) :

Combien de mondes estropiés, manqués, se sont dissipés, se reforment et se dissipent peut-être à chaque instant, dans des espaces éloignés... où le mouvement continue et continuera de combiner des amas de matière, jusqu'à ce qu'ils aient obtenu quelque arrangement dans lequel ils puissent persévérer.

Ce n'est point de Kant que Laplace tient la première idée de sa « nébuleuse primitive », mais des observations de l'astronome William Herschel. Son grand télescope l'a convaincu que certaines nébuleuses sont des nuées de matière diffuse, et que les étoiles doivent se former par condensation au sein de ces nuées. Ces observations, publiées en 1811, Laplace les reproduit au chapitre VI de son *Système du monde* (édition de 1824). Lui qui, par ailleurs, ne cesse de répéter à l'instar de son idole Newton « Je ne forge pas d'hypothèses », lance la plus sensationnelle hypothèse du siècle : une première nébulosité presque imperceptible où se forme un noyau à peine brillant, des anneaux de vapeur successivement abandonnés, tournant comme des cerceaux, puis se rompant en masses qui s'arrondissent à leur tour et où brillent d'autres petits soleils dans leur cocon brumeux... Le système solaire est né ! Les actuels modèles de formation du système solaire n'en diffèrent pas énormément.

Si la cosmogonie exposée par le grand mathématicien est une tentative d'explication rationnelle du sens imprimé au mouvement des planètes, elle va néanmoins féconder l'imagination des poètes. Ceux pour qui la genèse était explosive sont remplacés par ceux qui chantent la *nébuleuse primitive*. Pas d'émission brutale ni de parturition déchirante ; leur imagination s'attarde à une gestation lente des planètes-sœurs. Chez les savants du XIX^e siècle, l'hypothèse de la nébuleuse primitive est consolidée par les découvertes de l'analyse spectrale. Dans son *Astronomie populaire*, Flammarion salue en termes poétiques les nébuleuses gazeuses, voyant en ces lueurs les berceaux et les tombes de la création. Il use – le premier, semble-t-il – de l'expression « Nébuleuse-mère ». Jules Laforgue s'en saisit aussitôt dans ses poèmes cosmiques écrits la même année (1880). Écoutons aussi Jean Lahor, dans un extrait d'un texte intitulé *La Gloire du néant* :

Il fut donc un moment où tout dormait en germe dans l'œuf d'or du Soleil, ma vie, celle de tous les êtres, fils de la Terre, le monde organique et l'inorganique, les océans, les continents, les forêts, le bien et le mal, le ciel

et l'enfer d'ici-bas, et la Lune et les autres Êtres, filles du Soleil, avec leur évolution vitale, leur longue histoire, splendide ou sombre. Or de naissance en naissance ne pourrions-nous remonter jusqu'à Dieu, et à une heure première, où les Voies Lactées et les énormes Nébuleuses, l'Univers immense, reposaient aussi, comme des rêves près d'éclore, en la nuit muette de son cerveau ?

En cette fin de XIX^e siècle, nombreux sont les écrivains qui évoquent en la nébuleuse les images de fécondité, de gestation : germes, semences, embryons, laitance. Les astronomes munis de bons télescopes ont repéré dans le ciel les nébulosités qui entourent le groupe des Pléiades, étoiles jeunes encore enveloppées des nébulosités gazeuses qui ont présidé à leur naissance. Ainsi, en 1864, Flammarion compare les points de condensation du brouillard cosmique à

des petits nids soyeux d'insectes au flanc des branches.

Paul Claudel, dans son ode intitulée « La maison fermée », écrit :

*Comme on voit les petites araignées ou de certaines larves d'insectes
comme des pierres précieuses bien cachées dans leur bourse d'ouate et de
satin,*

*C'est ainsi que l'on m'a montré toute une nichée de soleils encore
embarrassés aux froids plis de la nébuleuse.*

Jules Laforgue, quant à lui, écrit :

*L'Espace, dans un Va-et-vient giratoire, y détrame les toiles
D'azur pleines de cocons à fœtus d'Étoiles.*

Le poème de Laforgue s'appelle toutefois « Le sanglot universel », car pour Laforgue, atteint d'un pessimisme très fin de siècle, les mondes nouveaux sont nécessairement synonymes de souffrances nouvelles.

La décennie 1880-1890 est particulièrement riche en textes placés sous l'influence de la genèse laplacienne : « Les origines », du Suisse Warnery, « La genèse universelle » de Strada, « Le dire du mieux » du Belge René Ghil.

Sur le plan de l'imagination, la cosmogonie laplacienne se rattache à un ensemble de vieux mythes qui placent, à l'origine, les eaux. Ces eaux où plane l'Esprit dans les premiers versets de la Genèse, substance première tant de fois adorée, conçue comme un liquide amorphe, passif, cédant avec douceur à ce qui plonge, engloutissant dans ses abîmes les poids trop lourds, mais portant, en une flottaison berceuse, ce qui se confie et s'abandonne. Ce fluide,

c'est l'élément prénatal dans le sein de la mère, c'est le plasma où baigne l'embryon. L'eau se retrouve au berceau de maintes cosmogonies, et ses fils se plaisent à imaginer la création terrestre sortie ruisselante de l'océan primordial. Jean Richepin a chanté « La gloire de l'eau » dans son long poème *La Mer* (1886). Le poète ne nous dépeint plus la grandiose naissance de la Terre, mais celle de la vie ; guidé par les découvertes darwiniennes sur l'évolution des espèces, il rêve sur le Bathybius, cette larve informe d'où jailliront nos ancêtres :

*Comment dans cette vase aux clapotements mous
Où les derniers volcans soulevaient des remous,
Comment sous l'action et les forces amies
Du soleil, des foyers souterrains, des chimies,
Du temps, comment a pu s'opérer en un point
Cette genèse, c'est ce que l'on ne sait point.
[...]
Un être existe là, que la science nomme
Bathybius, un être informe, sans couleur,
Une larve plutôt qu'un être, une pâleur
Encor plus qu'une larve, une ombre clandestine,
Semblable à du blanc d'œuf, à de la gélatine,
Quelque chose de vague et d'indéterminé.*

Dans les premiers vers, on croirait lire la description des expériences effectuées dans les années 1960 par les Américains Urey et Miller pour recréer en laboratoire les conditions physico-chimiques favorables à l'éclosion de la vie.

C'est au XX^e siècle que la cosmogonie est devenue une discipline scientifique à part entière, d'une part grâce à l'astrophysique, qui a permis de comprendre comment les étoiles et les planètes se formaient, grâce ensuite à la relativité générale et la cosmologie, qui ont permis à deux hommes de génie injustement méconnus, le Russe Alexandre Friedmann et le Belge Georges Lemaître, d'expliquer comment l'Univers dans son ensemble, en tant qu'entité espace-temps-matière, a surgi du Big Bang.

Comment ces nouvelles données de la science ont-elles influé sur l'imaginaire littéraire relatif aux origines ? Les rapports entre science et littérature ne sont pas nécessairement aussi littéraires que chez Richepin, heureusement d'ailleurs. À cet égard, le cas de Queneau est exemplaire. Cet auteur, considéré par certains comme un plaisantin, a fait une communication de mathématiques à l'Académie des sciences (j'admets que ce n'est pas un gage de sérieux suffisant), et il a parrainé le groupe de recherches de l'Oulipo fondé par le mathématicien François Le Lionnais. Sa *Petite Cosmogonie portative* (1950) est un récit du monde depuis ses origines jusqu'à nos jours présents. C'est probablement le premier écrit faisant allusion à la théorie de l'atome primitif que Georges Lemaître a proposée en 1930, dans laquelle, en se fondant sur les équations de la relativité d'Einstein, il décrit

scientifiquement la naissance de l'Univers sous forme d'une gigantesque explosion primordiale appelée aujourd'hui Big Bang.

*hyper leur quatre trucs éclatement burlesque
atome insuffisant atome gigantesque
rien à rien suffisant tout au tout romanesque
le monde était moins vieux que les supputations
et la terre moins grû que quelque pute à Sion
la terre était bien vierge et bien bouillonnaveuse
quelque constellation se penche un peu baveuse
sur des destins humains et des destins d'homards
tandis que le miel coule en la fesse argentée
des coquilles bleuies d'âge en âge hantées
par un diogène ermite à des noms raccordés
bernard de tout succinct crabe de tout refus
tandis que le salpêtre au frontière s'éloigne
des sources de soleil très indistinct témoignage
que des brouillons plus précis étalés
jeunesse oh jeunesse oh jeunesse nébuleuse.*

Ce petit bijou peut paraître obscur en première lecture, mais mérite d'être décrypté mot à mot (Queneau donne d'ailleurs lui-même quelques repères). Par exemple, « hyper leurs quatre trucs éclatement burlesque » est une évocation prémonitoire de ce que les physiciens appellent le découplage de la superforce en quatre interactions fondamentales (gravitation, électromagnétisme, interactions nucléaire forte et faible) qui gouvernent l'ensemble des processus physiques connus.

En cette fin de XX^e siècle, je noterai pour conclure deux choses. La première, c'est que tout comme la fin du XIX^e siècle, et plus encore car il s'agit d'une fin de millénaire, notre époque est placée sous le signe d'un questionnement accru sur les origines. Les colloques, débats et publications sur la question se multiplient, aussi bien scientifiques que philosophiques. Les grands programmes scientifiques eux-mêmes se focalisent sur ces questions ; dans le domaine de l'astronomie je ne citerai que la recherche de traces de vie fossile sur Mars, et l'exploration prochaine de Titan par la sonde Cassini-Huygens, qui dévoileront peut-être comment la vie est apparue sur Terre.

La seconde, c'est que la chronologie de la création est aujourd'hui assez bien établie. On pense être remonté jusqu'au premier dix milliardième de seconde d'une histoire cosmique longue de 15 milliards d'années. À cette époque, l'Univers était si dense et si chaud qu'il était opaque. Trois cent mille ans plus tard il a émis sa première lumière, que l'on capte aujourd'hui dans les radiotélescopes. Un milliard d'années plus tard se sont formées les premières galaxies, dont, sans doute, la nôtre. Au sein de la Voie lactée, plusieurs générations d'étoiles se sont succédé. Le Soleil s'est condensé une dizaine de milliards d'années plus tard, soit, en reprenant le

chronomètre à partir du présent, il y a 5 milliards d'années. Assez rapidement les planètes se sont agglomérées, les datations les plus précises sur l'âge de la Terre indiquant 4,56 milliards d'années. La vie aquatique – non pas sous forme du Bathybius, mais des stromatolithes et des procaryotes – est apparue très vite, il y a 3,5 milliards d'années. L'émergence de la conscience sur Terre, que l'on associe à *Homo sapiens*, est incroyablement récente : 200 000 ans. C'est le nouvel *Heptaméron* de la cosmologie moderne.

Tout n'est pas résolu, loin de là. Se pose d'abord le problème de l'inaccessibilité du temps zéro, que les théologiens du Moyen Âge avaient déjà commenté, et qui se retrouve aujourd'hui dans la cosmologie quantique. Il y a ensuite le problème de l'émergence des formes, sur lequel notre science bute toujours. Comment est-on passé de l'homogène au discontinu, de l'unité à la diversité ? C'est l'un des secrets les mieux gardés de la création. On sait au moins, on voit que la Nature est toujours à l'œuvre. Les télescopes à infrarouge nous montrent des accouchements d'étoiles au sein de nuages d'hydrogène interstellaire, des parturitions de planètes dans des disques de poussières. C'est une belle leçon. Pour l'écrivain et le poète, la naissance de l'astre est le symbole d'une naissance spirituelle. Dans un cosmos où la genèse est toujours en cours, la nébuleuse est partout présente, et les hommes sont des astres-enfants auxquels il ne manque que de révéler leur lumière.

1- Conférence donnée le 15 octobre 1997 à Royaumont lors du colloque « Sciences, mythes et religions en Europe ».

L'Univers, conquête ou servitude ?

Nous sommes à genoux ici, sur cette petite terre, devant l'Immensité, devant le monde incommensurable qui est au-dessus de nous, devant le cercle lumineux de l'Espace.

Élève ton esprit, et pense ce que je vois.

Quitte la terre, monte dans l'éther vide ;

Regarde, tout autour de toi, la voûte sphérique faite de soleils cristallisés, à travers les fentes de laquelle la nuit infinie regarde.

Tu peux voler durant des siècles sans atteindre le dernier soleil.

Tu fermes les yeux, et te lances en pensée par-delà l'abîme et par-delà tout ce qui est visible

Et, lorsque tu les rouvres, de nouveaux torrents, dont les vagues lumineuses sont des soleils, dont les gouttes sombres sont des terres, t'environnent, montent et descendent, et de nouvelles séries de soleils sont face à face, et la roue de feu d'une nouvelle Voie Lactée tourne dans le fleuve du Temps.

Entre les montagnes de feu errantes, entre les Voies lactées jetées d'un abîme à l'autre,

La terre, cette mouche, vole autour du soleil et plonge dans la lumière et s'émiette.

QUI aperçoit et conserve la petite poussière qui est sur la mouche, au milieu du chaos qui fermente, verdit et se désagrège ?

Lorsque chaque instant voit la mort d'un homme et d'un monde,

Lorsque le temps passe sur les comètes et les écrase comme des tisons et broie les soleils carbonisés

Lorsque les séries de mondes, les unes après les autres sont entraînées à l'abîme,

ô mon Ami, QUI nous voit et nous préserve, pauvres petits hommes de poussière ?

Je suis très honoré d'ouvrir les Biennales internationales de poésie par ce poème de Jean-Paul Richter, un romantique allemand du XIX^e siècle. Le poème est extrait d'un texte daté de 1795 qui s'intitule

La Plus Haute Pensée humaine. Y a-t-il en effet pensée plus haute que la question que l'on m'a demandé d'aborder ici, et que Jean-Paul Richter traite magistralement : l'Univers, conquête ou servitude ?

Je dois vous avouer que je n'aime guère le mot de « servitude ». C'est la raison pour laquelle je me permettrai d'insister sur l'aspect « conquête ». Oh, non pas conquête dans le sens triomphaliste, et même machiste, du terme, mais conquête au sens où le mot contient les notions de « quête » et d'« avec ». Conquête, « quêter avec », va alors très bien avec le mot univers. Car univers, c'est *versus*, aller en direction de, et *unus*, union ou unité.

Pour moi, la quête de l'Univers suscite une double réflexion. Je crois en effet que l'Univers ne sera pas conquis par l'homme tant que l'homme ne sera pas conquis par l'Univers. Je m'explique. Jusqu'à la Renaissance, le ciel restait inconnu et physiquement inaccessible, mais en un certain sens, il était plus familier. En effet, il n'était pas séparé du ciel religieux où résident les dieux et les anges, ni du ciel imaginaire que peuplent la mythologie, les arts, la littérature, la poésie, l'allégorie. Or, depuis le XVII^e siècle, les bouleversements de la vision du monde dus à Copernic, Kepler, Galilée et autres Newton ont anéanti cette convergence. De nos jours, ni le ciel de la religion ni celui des poètes ne se confondent avec celui qu'explorent les télescopes et les sondes spatiales. Les anciennes hiérarchies métaphysiques et spirituelles des sphères célestes ont cédé la place à d'autres étagements, fondés sur des critères purement physiques. Nous sommes aujourd'hui capables d'estimer la profondeur du ciel cosmologique, sa constitution, sa structure, nous disposons même de moyens sophistiqués pour voyager dans les airs et dans l'espace... Mais pour reprendre une formule de Daniel Pons : « On se penche jusqu'à tomber sur l'astro- et la microphysique, mais qui aidera l'homme à vivre debout, à garder sa station verticale entre ces deux extrêmes ? »

Ces questions, qui nous occupent plus que jamais à l'aube du troisième millénaire, semblent l'apanage des astronomes ou des philosophes davantage que des poètes. Le fait est que nous sommes aux Biennales internationales de poésie. Qu'a à dire de pertinent le poète sur l'Univers ? Y a-t-il une « poésie cosmique » comme il y a une science cosmique – la cosmologie – ou comme il y a une philosophie cosmique, à l'instar de celle de Giordano Bruno ?

Bien sûr, chacun se remémore quelques vers où sonnent des noms d'étoiles, des invocations à la Lune, au Soleil ou à la Voie lactée. Pour moi, cette poésie-là n'est pas « cosmique » ; elle n'utilise l'astronomie que comme élément de décor, et l'on peut sans doute lui appliquer ce que déclarait Platon il y a vingt-cinq siècles : « L'espace qui s'étend au-dessus du ciel n'a pas encore été chanté par aucun des poètes d'ici-bas,

et ne sera jamais chanté dignement. »

Ce n'est pas à vous que j'apprendrai que Platon a été démenti. Il y a eu et il y a encore d'authentiques poètes cosmiques, je veux dire des poètes *en quête* de l'Univers, qui ont su voir au-delà du décor. Jean-Paul Richter, avec qui j'ai commencé, est de ceux-là. Munis de leur intuition, d'une bonne dose de somnambulisme et, dans certains cas, d'une véritable prescience, ils ont su plonger dans un vertige cosmique pour y *conquérir* un certain espace – « le double univers du cosmos et des profondeurs de l'âme humaine », pour reprendre une expression de Gaston Bachelard. Ils ont ainsi rejoint d'autres conquérants d'univers qui brillent au firmament de la pensée, et qui s'appellent Kepler, Newton ou Einstein.

L'homme à la conquête de l'Univers

Notre avenir est dans l'air, tel est le titre d'une série de tableaux peints par Picasso vers 1912. Le désir d'accéder au ciel a toujours existé. Le mythe d'Icare rappelle combien l'homme a toujours rêvé de s'affranchir de la pesanteur et de conquérir l'espace. Expression d'un défi, volonté d'atteindre l'inaccessible, il symbolise aussi la progression spirituelle, l'ascension des âmes vers le bien, la divinité. De l'Antiquité à la Renaissance, l'évocation du voyage céleste mêle en effet le ciel spirituel et le ciel matériel.

Le voyage céleste, tant qu'il n'est pas encore réalisable matériellement, peut être approché par l'extase, ou par le rêve. La tradition spirituelle de la montée au ciel s'enracine dans le récit biblique du *Songes de Jacob*. Montée au ciel et recherche du divin forment les deux volets d'un même désir largement partagé, selon l'exemple de l'ascension du Christ ou de Mahomet, et réservé aux élus.

Le genre se prête à merveille à la poésie et à la philosophie, voire à la satire, comme *Le Songes de Scipion* de Cicéron. Le héros parvient dans une sorte de cirque d'une blancheur très lumineuse, au milieu de flammes, ce cirque que l'on appelle Voie lactée. Tout ce qu'il voit là lui semble splendide et merveilleux, tout sauf la Terre. Notre planète lui paraît minuscule, et il est désolé de voir que l'Empire romain ressemble à un point.

Dans le Moyen Âge chrétien, la traversée céleste a pour objectif de rejoindre le séjour divin, mais elle n'exclut pas les intentions didactiques, car c'est une excellente manière de présenter les systèmes du monde physiques ou cosmographiques. Dans *La Divine Comédie*, le voyage de dix jours que retrace Dante à travers l'enfer, le purgatoire, le ciel puis le paradis, s'il est essentiellement poétique et moral, livre également une conception topographique du ciel.

La Renaissance donne aux esprits un nouvel élan. L'attitude face

au ciel se fait plus hardie, plus confiante : l'homme a reçu en héritage le monde pour l'explorer et le dominer. Un tel enthousiasme est proche de la tentation d'orgueil. Le philosophe Giordano Bruno y cède à la façon d'un explorateur intrépide. C'est chez lui que nous trouvons pour la première fois l'ivresse du vol, sans appréhension ni hésitation aucune, et la joie du voyage sans fin, sans espoir de retour. La curiosité passionnée des hommes de la Renaissance habite aussi l'astronome Kepler. Pour le visionnaire allemand, le vol interplanétaire est pour demain, et les pionniers ne manqueront pas : « Qui aurait cru autrefois que la traversée du Grand Océan était plus calme et moins dangereuse que la navigation dans les golfes étroits et traîtres de l'Adriatique et de la Baltique ?, écrit-il. Créons des navires et des voiles adaptés à l'éther, et il y aura un grand nombre de gens pour n'avoir pas peur des déserts du vide. En attendant, nous préparerons, pour les hardis navigateurs du ciel, des cartes des corps célestes ; je le ferai pour la Lune et toi, Galilée, pour Jupiter. » Cette anticipation hardie, Kepler l'a écrit sous le choc du *Messenger céleste*, dans lequel l'Italien Galilée révélait ses découvertes télescopiques. Mais cette lecture n'a fait que confirmer sa propre intuition. L'année précédente, il avait déjà composé pour son plaisir personnel le premier voyage lunaire où se pose le problème physique du vol spatial : *Le Songe* de Kepler a l'air d'un voyage mythique, avec son peuple de démons volants, ses herbes magiques, ses commentaires astrologiques et son symbolisme médiéval ; c'est en réalité le premier voyage astronautique. Les navigateurs de l'espace sont sélectionnés et préparés comme les cosmonautes d'aujourd'hui par des démons ressemblant aux actuels « sorciers » de la NASA.

Aux XVI^e-XVII^e siècles, les analyses et les observations de Copernic, Tycho Brahe, Kepler, Galilée rendent caducs la physique aristotélicienne et les modèles du monde qui s'en inspirent. Galilée établit l'unité du monde. L'Univers étant gouverné par un seul ensemble de lois, il n'y a plus de place pour un ciel spirituel. La sphère des fixes éclate et le monde perd son caractère fini. Les échelons célestes où l'on situe Dieu, les anges, le Premier Moteur, disparaissent des représentations. Désormais, le ciel prolonge sans rupture qualitative le monde terrestre.

Le thème du voyage cosmique, devenu genre littéraire à part entière, s'enrichit de mille parures. *The Man in the Moone* de Francis Godwin (1638) conte les aventures du héros emporté jusqu'à la Lune par un équipage d'oiseaux. À la même époque, Cyrano de Bergerac imagine de nombreux moyens pour voyager dans le ciel. Dans *l'Histoire comique des États et Empires de la Lune* (1657), il propose un système de fusées dont les mises à feu successives permettent au héros de s'envoler dans les cieux.

Au XVIII^e siècle, après les théories sur l'espace, le temps et l'attraction universelle de Newton, l'Univers devient infini, et d'autant plus propice au voyage. La poésie romantique fait naturellement sienne la notion d'infini.

Au XIX^e siècle, science et technique triomphantes laissent entrevoir la possibilité concrète d'explorer un jour le ciel. À la suite des précurseurs Pilâtre de Rozier (qui fut le premier à s'élever dans les airs en 1783) et des frères Montgolfier, la conquête de l'air se développe dans la seconde moitié du XIX^e siècle et débride l'imagination. Les voyages interplanétaires sont maintenant considérés comme possibles. Les romans scientifiques de Jules Verne, toujours empreints d'un réalisme très poussé, en constituent les premiers spécimens. Dans *De la Terre à la Lune* (1865), le héros Michel Ardan est lancé dans l'espace à l'aide d'un canon de trois cents mètres de long. Les auteurs rivalisent d'imagination pour concevoir des moyens « scientifiques » d'aller dans l'espace. En 1901, H. G. Wells envoie *Les Premiers Hommes dans la Lune* grâce à la « cavorite », matériau qui annule les effets de la gravitation.

Si la science contemporaine n'en est pas encore là, elle a, en revanche, su développer les fusées. La fusée est le seul moyen que nous concevons aujourd'hui pour conquérir l'espace. L'idée en revient au Russe Konstantin Tsiolkovski, qui déclare en 1920 : « La Terre est le berceau de l'humanité, mais nul ne reste éternellement dans son berceau. » Tsiolkovski développe une véritable philosophie de l'astronautique, nimbée de matérialisme et de mysticisme. C'est un ardent partisan, non seulement de l'exploration, mais aussi de la colonisation de l'espace : « L'homme ne restera pas sur Terre à jamais, mais, toujours en quête de lumière et d'espace, il se hasardera d'abord timidement hors de l'atmosphère, puis fera la conquête du système solaire tout entier », déclare-t-il. De fait, l'Union soviétique sera la pionnière du voyage spatial : le Spoutnik envoie ses premiers « bips » le 4 octobre 1957. Youri Gagarine devient le 12 avril 1961, dans sa capsule Vostok, le premier homme dans l'espace.

Enfin, tout le monde connaît la date du 21 juillet 1969. L'Américain Neil Armstrong, premier homme à marcher sur la Lune, inaugure une ère nouvelle pour l'homme, futur habitant du ciel.

Le programme Apollo a emmené depuis de nombreux astronautes sur notre satellite naturel. Ces réussites ont couronné une période d'enthousiasme, où les progrès de la technique spatiale ont permis d'envisager exploration et colonisation de l'espace, voyages vers des civilisations extra-terrestres...

En cette fin de XX^e siècle, l'enthousiasme est toujours de mise, mais tempéré par des considérations économiques plus terre à terre.

Côté enthousiasme, « l'exploitation économique de la Lune, des

astéroïdes et de Mars sera le principal investissement du siècle prochain », déclarait en 1986 Thomas O. Paine, directeur de la NASA. Les stations spatiales, dont Tsiolkovski, von Braun, Clarke et bien d'autres avaient développé l'idée, sont aujourd'hui effectives. Les conquêtes de demain font rêver : dans les dix années à venir, la mission Cassini-Huygens enverra une sonde sur Titan, gros satellite de Saturne qui ressemble à notre Terre d'il y a 3,5 milliards d'années, sur lequel on espère trouver les conditions d'une chimie prébiotique primitive. La mission Rosetta ira planter une foreuse automatique dans le noyau de la comète Shane-Wirtanen² pour lui arracher des secrets datant de l'origine du système solaire, il y a 4,5 milliards d'années. Au milieu du XXI^e siècle, l'homme arpentera peut-être la surface de la planète Mars et songera à l'aménager pour la rendre habitable.

Le tableau n'est pas aussi idyllique qu'il en a l'air. L'économie et la politique mondiale se modifient, un certain réalisme économique est de mise, l'utilité de la présence de l'homme dans l'espace est fortement contestée. Déjà, le projet de station internationale tourne au ralenti. Il n'est pas certain qu'il soit mené à terme, ni qu'il soit suivi d'autres projets de ce genre. Les puissances financières, comme partout ailleurs, prennent le pas sur les autres considérations. Les progrès de la robotique laissent entrevoir une exploration automatique de l'espace dont la rentabilité économique est d'ores et déjà étudiée avec soin. En 1996, l'US Air Force estimait déjà la valeur du contenu en métaux d'un astéroïde autour de 100 000 milliards de francs.

C'est peut-être dans un tout autre domaine qu'est l'avenir de l'espace : agences spatiales, compagnies privées et cabinets d'architectes imaginent ce que pourrait être le tourisme spatial au cours du prochain millénaire. Des billets pourraient être proposés dès l'an 2000, à un tarif voisin de 600 000 francs³.

Pourtant, si l'on y songe, la conquête spatiale des trente dernières années est un bien grand mot. L'espace exploré est infime. L'homme est allé sur la Lune, à 380 000 kilomètres de la Terre ; ce n'est pas si mal, mais ce n'est rien au regard des distances aux autres planètes. L'homme a envoyé des sondes automatiques sur Vénus, Mars, Jupiter et les planètes lointaines. Voyager II, après vingt ans de voyage, se trouve maintenant à quelques milliards de kilomètres de la Terre ; mais ce n'est rien au regard des distances des étoiles les plus proches. L'homme a voulu faire connaître son existence à d'éventuels « frères du cosmos » par la lumière, son messenger le plus rapide ; depuis cinquante ans qu'il émet des ondes radio à travers l'Univers, son message de lumière a parcouru 500 000 milliards de kilomètres, c'est-à-dire 50 années-lumière ; mais ce n'est rien au regard des 100 000 années-lumière que mesure notre seule galaxie, qui elle-même n'est

rien au regard des 15 milliards d'années-lumière de l'univers observable.

C'est cela, la conquête de l'Univers dont on parle avec orgueil. Malgré tout, cette conquête d'un si infime espace restera l'achèvement scientifique, technologique et culturel le plus marquant du XX^e siècle. Les poètes et les artistes ne s'y sont d'ailleurs pas trompés. Dès l'envol des premiers cosmonautes russes en 1961, le poète Charles Dobzynski a entrevu combien l'âge interplanétaire ouvrirait de nouvelles formes du rêve. Son *Opéra de l'Espace* (1963) concilie la poésie et la technologie la plus ardue – celle des fusées. Le vide spatial est chair, dans lequel l'astronef-graine fondera le futur. Dobzynski dément ainsi avec brio ceux qui pensaient que le voyage cosmique, en tant que genre littéraire, deviendrait stérile dès lors que l'homme l'aurait matériellement accompli.

D'ailleurs, comment le genre pourrait-il mourir si l'on songe que le véritable espace des grands voyageurs est intérieur ? Ainsi le rappelle Henri Michaux (« Le dépouillement par l'espace », 1966). Dans l'espace du dedans, il y a autant de gouffres et de lumières lointaines que dans l'espace galactique, et de quoi s'y perdre en dérives infinies. Aidé par des substances psychotropes (qui nous renvoient aux herbes magiques de Kepler !), Michaux « entre en espace » comme un nageur pénètre l'océan. Et l'être, ainsi espacifié, épouse le sublime mouvement de l'espace lui-même : l'expansion infinie.

Espace en quête ou espace en conquête... Quelles que soient les entreprises humaines dans les champs du savoir et de la technique, cosmos et poésie ont encore un long chemin à parcourir ensemble.

Relisons quelques lignes de Michaux :

Le ciel, j'y étais. Nous avions enfin des rapports.

[...] Je recevais le ciel et le ciel me recevait.

Simultanément, j'étais dans une expansion extraordinaire. L'espace m'espacifiait...

De quantité d'autres façons encore, il me venait. L'espace était partout.

Dans une sorte de nausée devenue délices, je voguais, balancé sous les étoiles, lointaines et mouvantes, semblables par moments aux feux de navires que de nuit l'on voit au loin tanguant sur la mer houleuse, feux qui ici eussent été ceux de navires galactiques naviguant sur l'océan du sans-bornes. Cet océan était en tous sens, et seul comptait.

L'espace était permanent. Il n'était pas invariant. Même il variait constamment. Pendant longtemps il fut en augmentation. Des espaces au-delà de cet espace se formaient nouvellement, espaces qui après quelque

temps en engendraient d'autres, et encore d'autres, de façon que chaque nouvelle nature d'espace défaisait le précédent, lui soustrayant encore un je-ne-sais-quoi, pour le rendre plus immatériellement espace, espace purifié, sans plus rien d'hétérogène à lui.

Espace, espace au-delà de tout. Contemplation. Face à face et pas seulement face à face. Partout j'avais front commun avec lui, le rencontrant de tous côtés. Indépassable et sans rien de « singulier », sans donner à l'esprit une seule prise. Cependant, j'étais en plein échange. Contempler, je le voyais, n'était pas ce que j'avais cru. Contemplation, c'est être reçu.

L'Univers à la conquête de l'homme

Cette intégration de l'espace extérieur à l'espace intérieur m'amène à la deuxième partie de mon exposé. Je le répète, l'Univers ne sera pas conquis par l'homme tant que l'homme ne sera pas conquis par l'Univers – autrement dit, tant que l'homme n'aura pas intégré une certaine image mentale de l'Univers, tant qu'il n'aura pas fait entrer d'une certaine façon le ciel dans son cœur et dans son esprit.

L'Univers peut être considéré comme le type même de toute construction mentale. Il est la pierre de touche de l'imagination créatrice. En présence de ce qu'il y a de plus vaste et de plus subtil, de plus étranger et de plus intime à la fois – l'Univers –, les imaginations se séparent et se regroupent spontanément en deux familles, deux tempéraments pratiquement irréconciliables que j'appelle des « sentiments esthétiques du monde ». Ces deux sentiments esthétiques du monde, que l'on peut rattacher à deux philosophes emblématiques de l'Antiquité grecque, Parménide et Héraclite, coexistent tout au long de l'histoire.

Chez les uns – les descendants de Parménide – règne l'harmonie du monde, et l'homme trouve naturellement sa place dans cette belle construction. Cette place a, certes, varié au cours des âges. Initialement centrale à tous égards (l'homme au sommet de la création divine sur une Terre au centre du monde), elle s'est décalée sous la poussée des découvertes scientifiques. Avec Copernic, Newton et leurs successeurs, la Terre est devenue une simple planète tournant autour d'une étoile banale, elle-même gravitant dans une galaxie banale parmi des milliards d'autres galaxies. Avec Darwin et les théories de l'évolution, l'espèce humaine n'apparaît plus comme le sommet de la création, mais comme l'extrémité provisoire d'un rameau chanceux (?) sur l'arbre de la vie. Mais quels que soient les bouleversements de l'image du monde, pour ces esprits-là l'idée d'harmonie entre l'homme et l'Univers ne peut finir. Ils livrent une lutte infatigable pour

retrouver cet ordre exigé par les lois qui régissent leur propre fonctionnement mental, à eux, fils du cosmos, et qui ne peuvent s'y croire étrangers.

Chez les autres s'impose un univers aveugle et absurde, où, si un ordre relatif s'établit parfois et de façon purement mécanique, le désordre reste la loi. Dans cette vue, qui se rattache au tempérament « héraclitéen », l'harmonie du monde est pure construction de l'esprit. Dans un univers absurde, l'homme vit mal ; évacué de la scène cosmique, il n'a nulle place, sinon, au mieux, celle d'une brève floraison sans lendemain, au pire celle d'une vermine. Les penseurs de cette famille, attirés ni par la perfection des sphères célestes ni par les vertiges de l'infini, se font donc les porte-parole de la misérable condition humaine, broyée par une immensité cosmique indifférente.

On pourrait croire que les développements de la science astronomique ont favorisé, à telle ou telle époque, telle ou telle vue du monde. Il n'en est rien. Quelles qu'aient pu être les révolutions scientifiques qui ont changé la représentation objective de l'Univers, l'image subjective et l'interprétation que nous nous en faisons reste affaire de tempérament, soit parménidien, soit héraclitéen.

L'histoire de la cosmologie a connu essentiellement quatre changements de paradigme. Le premier remonte à la Grèce antique, au VI^e siècle avant notre ère, lorsque, avec Thalès, Anaximandre, Démocrite, suivis de Platon et Aristote, le discours logique sur l'Univers a remplacé peu à peu le discours mythique des Homère et autres Hésiode. Le deuxième est l'apparition de l'héliocentrisme au XVI^e siècle, avec Copernic, Galilée, Kepler. Le troisième est l'avènement de l'espace infini et de l'attraction universelle avec Newton, à la fin du XVII^e siècle. Le quatrième est l'apparition de la théorie de la relativité et de l'espace-temps courbe d'Einstein, au début du XX^e siècle, suivie peu après par les modèles de Big Bang inventés par le Belge Georges Lemaître en 1930.

Chacune de ces révolutions scientifiques a suscité, chez les penseurs, les artistes et les poètes, les deux types d'interprétation possibles : l'univers accueillant ou l'univers hostile.

Prenons par exemple le Moyen Âge occidental. L'homme d'alors se sent en harmonie avec le ciel, avec ses astres et ses constellations. Au VII^e siècle, Isidore de Séville reprend les idées platoniciennes et introduit le terme de « microcosme » : « Au sens allégorique, on peut dire que l'homme est le monde, parce qu'il est fait des quatre humeurs comme celui-ci est formé des quatre éléments. Les anciens avaient noté cette analogie et tandis qu'ils appelaient le monde cosmos, ils donnaient à l'homme le nom de microcosmos ou petit monde. » La médecine antique se fondait sur des analogies symboliques entre les astres, ou des zones du ciel, et les parties du corps. Encore au

XVI^e siècle, le médecin alchimiste Paracelse proclame, au nom de l'harmonie universelle, la similitude des étoiles intérieures de l'homme avec les étoiles extérieures.

Cette philosophie parméniidienne s'est développée au sein du christianisme. Ce lien intime entre vécu intérieur et vie extérieure du monde est particulièrement souligné par la mystique rhénane Hildegarde de Bingen : « L'homme a en lui-même le ciel et la terre », écrit-elle.

C'est dans d'autres cultures qu'il faut chercher, aux mêmes époques, l'expression d'un sentiment héraclitéen. Dans la civilisation arabe, par exemple, des poètes de première grandeur comme Omar Khayyâm (XI^e siècle) et Galal al din Rumî (XIII^e siècle) nous préviennent que l'homme n'est que poussière. Dans leurs *Quatrains*, ils ont raillé la prétention des hommes à vouloir déchiffrer l'énigme du ciel. Chacune de leurs strophes sur la petitesse de la condition humaine est d'une immense envergure. L'homme n'est vraiment qu'un pion sans importance sur l'échiquier cosmique. D'où venons-nous ? Où allons-nous ?, sont de vaines questions. Plaisirs terrestres pour l'un, méditation mystique pour l'autre, peuvent seuls nous faire oublier l'absence de réponse.

Passons maintenant à la révolution scientifique du XVII^e siècle, qui a vu le passage de la représentation du monde clos à celle de l'univers infini.

Ce siècle marque un tournant, à la fois scientifique et épistémologique, anticipé par Copernic et accompli par les Kepler, Galilée, Descartes, Newton. L'époque voit définitivement disparaître la distinction entre physique terrestre et physique céleste, et s'installer l'idée d'univers – entité unique où les lois de la physique, partout les mêmes, sont précisément *universelles*.

En un certain sens, on peut dire que l'Univers détrône le ciel. Alors que lunettes et télescopes dévoilent des horizons de plus en plus distants, la vision scientifique se met en place. Par nature très réductrice, elle frustre plus d'un esprit. Le ciel perd son mystère ; il n'échappe plus à nos lois, il n'est plus un « ailleurs » mais un domaine à explorer comme un autre. Ciel matériel et ciel spirituel sont dissociés. Le ciel que nous voyons au-dessus de nos têtes devient celui des savants et des physiciens.

Le monde clos d'Aristote, c'est-à-dire l'univers enfermé dans un emboîtement de sphères concentriques, était en un sens rassurant puisqu'il procurait une « maison fermée » pour l'homme. L'univers infini de Newton, lui, peut devenir générateur d'angoisses et de terreur, dans la mesure où l'individu, n'ayant plus ni centre ni bord, y perd tout repère. En témoigne la célèbre pensée de Pascal : « Le silence éternel des espaces infinis m'effraie. »

De fait, l'astronomie nouvelle fera le plan de clivage entre les tempéraments humains : ceux qui, à l'idée d'une Terre voguant au sein d'un Océan infini, ont le mal de mer, et ceux qui ont le pied marin... Ceux qui, comme le libertin de Pascal, se sentiront perdus dans l'immensité, ou ceux qui, comme Giordano Bruno, éprouveront la griserie de la libération. Ce même Giordano Bruno considère l'espace comme un gigantesque corps vivant, dont l'âme se manifeste dans toutes ses parties. Sa philosophie, qui unifie les questions concernant l'homme et celles concernant l'Univers, le conduira d'ailleurs au bûcher.

À la suite de Pascal, des générations de poètes héraclitéens ont réagi différemment de Bruno devant l'élargissement du panorama cosmique. Ils y ont vu confirmation que l'univers entier n'est qu'une géhenne où l'animal naît pour la souffrance et la mort. Monotonie dans le malheur, confusion, tumulte, affolement, voilà ce qu'est l'œuvre du Créateur. Cette vue s'impose par exemple au jeune Laforgue. Il est de ceux qui, frappés par la position marginale du Soleil dans notre galaxie, sont malades à l'idée de n'être pas au centre. L'espace infini, la durée infinie l'obsèdent non pas pour la merveilleuse variété qui peut s'y déployer, mais pour toutes les catastrophes qui s'y sont produites et s'y produiront. On est perdu, on est seul, on va mourir... Il se suicidera d'ailleurs à l'âge de 27 ans. Sans toujours tomber dans ces extrêmes, spleen indéfinissable, sentiment exacerbé de la vanité de la vie, de l'amour, de la pensée sont les thèmes favoris d'une certaine poésie décadente, en vogue à la fin du XIX^e siècle.

Au début du XX^e siècle, Paul Claudel veut, en bon « parménidien » qu'il est, restaurer la dignité de l'homme, en rassemblant autour de lui le cosmos, dont il fait, à la lettre, une « maison fermée ». Claudel part d'un mauvais procès qu'il intente à la notion d'infini, dont le caractère vertigineux est, selon lui, délétère pour l'imagination, avilissant pour la dignité humaine et, pour tout dire, responsable de la perte du sens religieux. Il veut montrer que la place de l'homme est centrale, prépondérante, unique. Il reconstitue un univers circulaire, ordonné, séduisant pour un esprit en quête d'harmonie, rassurant pour qui cherche la stabilité. Claudel développe ces idées dans des écrits en prose à l'argumentation mathématique et philosophique erronée. Par bonheur, il en sublime le matériau dans ses écrits poétiques. Dans une lettre à André Gide datée du 8 novembre 1908, il prévient : « Ce que peindront mes Odes, c'est la joie d'un homme que le silence éternel des espaces infinis n'effraie plus, mais qui s'y promène avec une confiance familière » et, dans sa *Lettre sur Coventry Patmore* : « Nous n'habitons pas un coin perdu d'un désert farouche et impraticable. Tout dans le monde nous est fraternel

et familial. »

Remémorons-nous maintenant la dernière des révolutions cosmologiques, la relativité. Au début du XX^e siècle, l'influence scientifique et culturelle de Newton restait prépondérante. Mais les temps avaient changé ; avec l'électromagnétisme de Maxwell, les théories sur la lumière s'étaient développées. Dans l'interprétation poétique de l'électromagnétisme, l'unité secrète du monde n'est plus achevée par la loi d'attraction, mais par ce réseau de lumière impalpable qui tisse l'espace cosmique. Des particules y voyagent d'un monde à l'autre sur les ailes de la lumière. Un siècle auparavant, le savant mystique Emmanuel Swedenborg et le poète romantique Jean-Paul Richter – encore lui – avaient entrevu cette nouvelle unité, mais ils l'avaient supposée perceptible aux seuls anges. Or c'est un savant qui, par une réflexion profonde sur la nature et le mouvement de la lumière, va réussir à la rendre perceptible aux hommes : Albert Einstein. Ses nouvelles conceptions sur la relativité de l'espace et du temps sont énoncées en 1905. Sa théorie de la relativité générale, publiée en 1915, propose un nouveau cadre de compréhension de l'Univers en termes d'un espace-temps élastique, tissé par la lumière, courbé par la matière. La loi d'attraction universelle est remplacée par un concept plus difficile mais ô combien enthousiasmant : la courbure de l'espace-temps !

L'univers relativiste a influencé les penseurs, les artistes et les poètes, mais certainement moins que la révolution copernicienne ou la physique newtonienne. On peut supposer que le temps de « digestion » d'une théorie aussi complexe est plus long.

Au milieu de notre siècle, Francis Ponge a d'ailleurs publié un texte étonnant destiné à l'origine à des ingénieurs de la compagnie d'électricité, intitulé simplement *Texte sur l'électricité*. Ponge se débarrasse en quelques lignes de son sujet pour livrer un véritable manifeste de la poésie scientifique à la lumière des dernières découvertes de la relativité et de la mécanique quantique. Pour lui, de nouvelles déesses nommées année-lumière, onde ou énergie sont nées de l'ingéniosité humaine. Génératrices de vertige, elles indiquent au poète de nouveaux champs d'exploration (mais avec l'humour qui le caractérise, Ponge suggère que cela ne sera pas facile).

Plusieurs poètes contemporains ont répondu, chacun à leur façon, à l'injonction de Ponge. Parmi les écrivains à l'écoute de la relativité, on peut noter Marinetti et Khlebnikov, Queneau, Michaux et bien d'autres encore que je me suis plu à citer dans mon anthologie *Les Poètes et l'Univers*.

Dans ce nouveau cadre de pensée cosmologique, qu'en est-il de cette relation de parenté entre l'homme et le cosmos, revendiquée par Claudel et les parménidiens ?

Ce sont les avancées astrophysiques dans le domaine de l'évolution stellaire qui se sont avérées les plus fécondes à cet égard. Elles nous apprennent que l'émergence de la complexité est le fruit d'une longue histoire, impliquant l'Univers tout entier depuis 15 milliards d'années. Chaque atome de notre corps a été forgé au sein de générations d'étoiles aujourd'hui disparues. La conscience, l'homme, et plus généralement la vie, sont au sens propre les « enfants » des étoiles. Dans ce schéma de pensée, l'homme comprend que c'est à la démesure même de l'Univers qu'il doit sa propre existence. Ni centre, ni sommet, mais indéfectible maillon dans l'évolution cosmique, l'homme sait qu'il doit un jour disparaître, mais il aura au moins compris pourquoi il est apparu, et pourquoi il disparaîtra.

Avec la cosmologie du XX^e siècle, l'homme se retrouve donc, d'une façon inattendue, inexorablement attaché à l'étoile. Cette étoile dont le symbolisme se retrouve sous des formes diverses dans toutes les religions, sectes, sociétés... de toutes civilisations, jusqu'au drapeau de l'Union européenne ! « C'est dans ton cœur que se trouvent les étoiles de ton destin », déclarait Schiller. Ce destin étant si incompréhensible, toute époque a été tentée d'invoquer, pour l'expliquer, des forces ou des influences mystérieuses venues d'ailleurs. Le ciel inconnu représentait cet ailleurs : conjonctions favorables ou défavorables, bonnes ou mauvaises étoiles, cieus propices... Or le ciel connu par la science d'aujourd'hui nous affirme avec force et simplicité : l'homme est le fils du ciel. Nous sommes, au sens propre, des enfants de l'Univers.

Les enfants interrogent leurs parents, c'est bien connu. Mais dans le cas de l'Univers, les astres nous renvoient la question intacte. C'est ce que m'a rappelé récemment mon ami le poète Jean Orizet. Telle pourrait être ma conclusion. Je me risque toutefois à finir sur une note plus personnelle. Il y a quelques années, je vivais dans un petit appartement du boulevard Arago, à Paris, à quelques pas de l'Institut d'astrophysique. Presque chaque matin, je croisais en bas de l'immeuble un vieil homme fatigué, en pantoufles et robe de chambre élimées, venant chercher dans la petite boîte aux lettres un signe venu de l'espace extérieur. Enfermés dans nos solitudes respectives, nous ne nous sommes jamais parlé. Je n'ai regardé son nom sur la boîte que le jour où j'ai déménagé. Il y avait marqué dessus : Jean Tardieu. Quelques semaines plus tard, j'ai appris sa mort. Alors, en relisant « Le ciel ou l'irréalité », qu'il avait composé entre 1950 et 1961, un torrent d'images a déferlé... Je l'ai vu, seul dans son modeste appartement, prisonnier des quatre murailles qui sont les murailles de la vie, ressentant toute la lourdeur du monde. Mais dès que la nuit vient, les parois s'effacent, le théâtre s'agrandit, son esprit gagne les hauteurs,

s'envole vers le ciel, vers ce pays de l'irréalité qu'il appelle sa patrie. Ainsi l'Univers a-t-il conquis le cœur de l'homme, et nous aurons conquis le cœur de l'Univers.

Pour qui va dans le jour, les yeux fixés sur les murailles de sa vie, tout est confusion et lourdeur.

Mais, la nuit, hors du toit et des cloisons, quand s'annonce le Spectacle, quand les rampes du ciel s'allument – alors, rideaux de nos paupières, levez-vous sur cette scène illustre où l'Espace et le Temps, cherchant à s'engloutir l'un l'autre, jouent leur drame cruel sous le manteau de la sérénité !

Ici, près de nous, sont les objets de ce pauvre ménage et tout ce que le pas des hommes a mesuré sur sa misère. Mais, plus loin, le théâtre grandit, bourdonnant de silence, plus loin les masses ne sont plus que lignes, plus loin encore, pulsations de points d'or, caresses de l'obscurité, velours de l'éternelle absence.

[...]

Là-haut j'énumère ces points que je vois qui scintillent, plus loin ceux que je distingue à peine, enfin je songe à tout cela que je ne puis apercevoir, jusqu'à l'heure où, plongé tout entier dans le sommeil des éléments, je rejoins à la nage cette obscurité radieuse où toutes choses [...] se trouvent enfin révolues.

Alors me soulève de son vol égal et calme la faculté de Mémoire qui m'apprend à me souvenir de l'instant même et me montre à nos pieds dans cette basse plaine [...] ce que je pleure et ce que je sais.

Sur ce promontoire de cristal transpercé d'évidences, au bruit de poulies parfaites, vivre, mourir et connaître ne font qu'un. Une certitude ailée me délivre de ma lourdeur et, sans arme, sans crainte, comme sans limite et sans figure, ayant mon souffle pour toute puissance, mon regard pour toute parole, mon désespoir pour talisman, je monte au-devant de ce silence où je retrouve ma patrie.

1- Conférence inaugurale donnée le 3 septembre 1998 aux Biennales de la poésie de Liège (Belgique).

2- Lancée avec retard le 2 mars 2004, la sonde Rosetta a dû changer de cible et devrait rencontrer la comète Churyumov-Gerasimenko en 2014 *[Note ajoutée pour la présente édition]*.

3- Estimation trop optimiste. Les premiers vols spatiaux touristiques à bord de la station spatiale internationale (ISS) ont commencé en 2001 et ont coûté dans les 30 millions de dollars. La société Virgin Galactic, créée en 2004, propose quant à elle des vols suborbitaux permettant aux passagers de passer cinq minutes en apesanteur, pour une somme avoisinant les 200 000 dollars *[Note ajoutée pour la présente édition]*.

Douze petites cosmologies d'Edgar Poe¹

Le maelström cosmique

Je fus possédé de la plus ardente curiosité relativement au tourbillon lui-même. Je sentis positivement le désir d'explorer ses profondeurs, même au prix du sacrifice que j'allais faire ; mon principal chagrin était de penser que je ne pourrais jamais raconter à mes camarades les mystères que j'allais connaître. [...] Jamais je n'oublierai les sensations d'effroi, d'horreur et d'admiration que j'éprouvai en jetant les yeux autour de moi. Le bateau semblait suspendu comme par magie, à mi-chemin de sa chute, sur la surface intérieure d'un entonnoir d'une vaste circonférence, d'une profondeur prodigieuse, et dont les parois, admirablement polies, auraient pu être prises pour de l'ébène, sans l'éblouissante vélocité avec laquelle ils pirouettaient et l'étincelante et horrible clarté qu'elles répercutaient sous les rayons de la pleine lune, qui, de ce trou circulaire que j'ai déjà décrit, ruisselaient en un fleuve d'or et de splendeur le long des murs noirs et pénétraient jusque dans les plus intimes profondeurs de l'abîme.

Edgar Allan Poe, *Une descente dans le maelström*.

L'analogie entre le phénomène du tourbillon et celui d'un trou noir en rotation dans l'espace-temps, tel qu'il est décrit par la théorie relativiste, est profonde. Qu'il s'agisse du simple tourbillon d'eau se formant à l'écoulement d'une baignoire, ou à plus grande échelle, des maelströms géants produits par les courants marins, comme le légendaire Moskoestrom au large des côtes de Norvège décrit par Edgar Allan Poe dans ses *Histoires extraordinaires*, l'eau est entraînée en un mouvement de spirale qui se décompose selon un mouvement circulaire et un mouvement d'aspiration vers le centre. Le mouvement circulaire s'effectue à une vitesse purement tangentielle, proportionnelle à l'inverse du carré de la distance au centre du tourbillon ; le mouvement d'aspiration se fait avec une vitesse purement radiale bien plus petite que la précédente, qui varie en raison inverse de la distance au centre.

Imaginons qu'un bateau à moteur s'aventure dans un tourbillon

marin. En eau calme, son moteur lui permet d'atteindre la vitesse maximale de quinze nœuds. Loin du tourbillon, le bateau peut naviguer au gré de son pilote : grâce à son moteur, ce dernier peut facilement compenser le mouvement d'entraînement de l'eau. Il peut donc rester en position fixe sans avoir besoin de jeter l'ancre, il peut se rapprocher ou s'éloigner du tourbillon, ou encore naviguer en sens contraire du courant.

Si le navigateur décide de se rapprocher du centre du tourbillon, il arrive un moment où la vitesse circulaire du courant marin devient égale à la vitesse maximale du bateau : quinze nœuds. À l'intérieur de cette distance critique, le bateau n'est plus en mesure de garder une position fixe, même en faisant tourner le moteur à plein régime. Il est irrésistiblement entraîné dans le sens de rotation du courant. À partir d'une position initiale donnée, les directions possibles de navigation ne sont plus arbitraires, mais limitées à l'intérieur d'un angle formé par les droites issues de la position du bateau, et tangentes à un « cercle de navigation » situé en avant. Toutefois, bien qu'entraîné par le courant circulaire, le bateau peut encore échapper au tourbillon, en orientant sa trajectoire selon une spirale sortante. Dans le récit d'Edgar Poe, le narrateur raconte précisément comment il a pu échapper au tourbillon en s'arrimant à une barrique et en orientant convenablement sa trajectoire, tandis que son frère, resté dans le navire ingouvernable, a été happé par le maelström. En effet, le bateau s'aventurant toujours plus près du centre du tourbillon, arrive le moment fatal où la vitesse radiale du courant atteint à son tour les quinze nœuds limites du bateau (la vitesse circulaire étant déjà beaucoup plus grande). Alors, les cercles de navigation plongent tellement dans la gueule du tourbillon que tout navire qui entre dans la région de son attraction est inévitablement absorbé et entraîné au fond, et là, déchiré en morceaux.

Qu'en est-il de la géométrie de l'espace-temps régnant autour d'un trou noir en rotation ? Le centre du tourbillon, c'est le trou noir. La surface de la mer creusée par le tourbillon, c'est l'espace incurvé par la gravitation et entraîné à la dérive dans le sens de rotation du trou noir. Le bateau, c'est un vaisseau spatial ou n'importe quelle particule matérielle, dont la vitesse maximale permise est celle de la lumière, 300 000 km/s. Le cercle de navigation en un point donné est une projection spatiale du « cône de lumière », qui circonscrit les trajectoires permises dans l'espace-temps. Ces cônes de lumière sont non seulement déviés vers l'intérieur du champ gravitationnel, mais ils sont également entraînés dans le sens de rotation du trou noir. Cette dérive est inexorable à l'intérieur de la *limite statique*. Passé cette région, les cercles de lumière – projection des cônes – sont détachés de leur point d'émission et décalés vers l'avant. Par conséquent, le

vaisseau spatial ne peut plus rester statique par rapport à un référentiel fixe lointain (par exemple les étoiles), même si sa vitesse atteint celle de la lumière.

Plus près encore du centre du trou noir, il existe une deuxième surface critique à partir de laquelle les cônes ont tellement basculé vers le fond que rien ne peut plus s'échapper. Cette limite de non-retour, l'horizon des événements, marque la véritable frontière du trou noir.

La région d'espace-temps qui s'intercale entre l'horizon et la limite statique est l'ergosphère. Le terme a été forgé à partir du mot grec signifiant énergie, car l'utilisation de certaines de ses propriétés déconcertantes permet théoriquement d'extraire l'énergie de rotation du trou noir.

Le temps gelé

La circonférence mathématique est une courbe composée d'une infinité de lignes droites. Mais cette idée de la circonférence [...] est aussi, en stricte réalité, la seule conception pratique que nous puissions façonner à notre usage pour l'intelligence de cette circonférence majestueuse à laquelle nous avons affaire, au moins en imagination, quand nous supposons notre système tournant autour d'un point situé au centre de la Galaxie. Que l'imagination la plus vigoureuse essaye seulement de faire un pas, un seul, vers la compréhension d'une courbe aussi inexprimable ! Sans commettre un paradoxe, on pourrait dire qu'un éclair même, qui suivrait éternellement la circonférence de cet inexprimable cercle, ne ferait que parcourir éternellement une ligne droite.

Edgar Poe, *Eurêka*.

Nous sommes condamnés, sans doute, à côtoyer éternellement le bord de l'éternité, sans jamais faire notre plongeon définitif dans le gouffre.

Edgar Poe, *Manuscrit trouvé dans une bouteille*.

En gravitation relativiste, les trajectoires des « éclairs », en l'occurrence des rayons lumineux, sont astreintes à épouser la courbure de l'espace-temps ; elles sont donc déviées de la ligne droite tout en restant des géodésiques, c'est-à-dire des droites dans un espace courbe. À la limite statique d'un trou noir, les signaux lumineux tournent en cercle, éternellement confinés entre la chute et l'envol. Ils tissent une sorte de cocon ténu de lumière entourant le trou noir, dont les astronomes lointains verront indéfiniment fuir quelques photons.

Dans la géométrie du trou noir, l'espace et le temps deviennent pathologiques à l'intérieur de l'horizon. Les règles et les horloges permettant de mesurer distances et durées ont, à son approche, un

comportement apparemment aberrant : l'une devient infinie, l'autre nulle. Selon les termes du physicien Arthur Eddington, « il y a un cercle magique au-delà duquel aucune mesure ne peut nous conduire ».

Un vaisseau spatial a pour mission d'explorer l'intérieur du trou noir. À son bord, le commandant rend un salut solennel à l'humanité juste au moment où le vaisseau franchit, sans espoir de retour, l'horizon des événements. Son geste est transmis à des spectateurs lointains au moyen d'images télévisées. Les images sont prises à bord à intervalles égaux, selon le temps propre du vaisseau. Le salut du commandant débute à 0,0 seconde à l'horloge de bord et s'achève à 1,2 seconde. La traversée de l'horizon, qui se produit au cours du geste, ne s'accompagne d'aucun phénomène particulier : pour l'explorateur, la frontière du trou noir n'a rien de matériel.

La succession des images reçues sur l'écran de contrôle des spectateurs est bien différente. Initialement, les films sont identiques, mais à mesure que le vaisseau se rapproche de l'horizon, le film reçu se ralentit indéfiniment, jusqu'à ne délivrer plus qu'une sempiternelle image montrant l'astronaute éternellement figé dans son salut à mi-course, à la position correspondant à sa traversée de l'horizon. Hormis ceux qui l'accompagnent dans sa chute, personne ne le verra donc jamais accomplir la traversée.

Ce gel du temps apparent, qui se traduit par des intervalles dilatés de réception des signaux, est une illustration extrême de l'élasticité du temps prédite par la théorie de la relativité d'Einstein, selon laquelle le temps s'écoule différemment pour deux observateurs en accélération relative. Le commandant en chute libre vers le trou noir est effectivement accéléré par rapport aux spectateurs stationnaires qui l'observent. Par conséquent, son *temps propre* de chute, mesuré par sa propre horloge, est distinct du *temps apparent* mesuré par toute horloge lointaine. Le salut du commandant s'effectue en un temps propre fini, mais en un temps apparent infini. Un spectateur extérieur ne pourra *jamais voir* aucun corps atteindre la surface d'un trou noir et, *a fortiori*, il ne pourra jamais voir au-delà.

Le fond du vortex

Mais il me reste peu de temps pour rêver à ma destinée ! Les cercles se rétrécissent rapidement – nous plongeons follement dans l'étreinte du tourbillon et, à travers le mugissement, le beuglement et le détonement de l'Océan et de la tempête, le navire tremble, oh ! Dieu !, il se dérobe, il sombre !

Edgar Poe, *Manuscrit trouvé dans une bouteille*.

Kircher et d'autres imaginent qu'au centre du couloir du Maelström est un abîme qui pénètre le globe et ressort en quelque lieu éloigné.

Edgar Poe, *Eurêka*.

Edgar Poe n'adhère pas à l'idée de Kircher ; selon lui, le maelström converge en un point de densité infinie, une singularité d'essence énergétique, esthétique et spirituelle. Une problématique analogue se pose avec le trou noir relativiste. Le puits creusé par le trou noir dans le tissu élastique de l'espace-temps est-il *pincé* par un nœud de courbure infinie – auquel cas toute la matière qui tombe dans le trou noir se tasse indéfiniment dans une singularité ? Ou bien le fond du trou noir est-il *ouvert* vers d'autres régions de l'espace-temps par des sortes de tunnels ? Cette deuxième possibilité, apparemment extravagante, est suggérée par certaines solutions mathématiques de la relativité. Un *trou de ver* est une structure topologique exotique ressemblant à une « poignée d'espace-temps », qui relierait deux régions de l'Univers dont l'une serait un trou noir et l'autre un *trou blanc*. Ce raccourci d'espace-temps, qui permettrait de parcourir en quelques fractions de seconde des millions d'années-lumière sans jamais dépasser la vitesse de la lumière, a fasciné les physiciens tout autant que les écrivains de science-fiction. Des études plus détaillées montrent qu'un tel trou de ver est fondamentalement instable, et qu'il ne peut donc pas se former réellement dans l'effondrement gravitationnel d'une étoile et la naissance d'un trou noir : aussitôt constitué, il serait détruit et bouché avant qu'aucune particule n'ait le temps de le traverser.

Des modèles suggèrent que les trous de ver pourraient cependant exister à l'échelle microscopique. En fait, la structure la plus intime de l'espace-temps pourrait être constituée d'une mousse perpétuellement changeante de microtrous noirs, microtrous blancs et minitrous de ver, traversés de façon fugace par des particules élémentaires pouvant éventuellement remonter le cours du temps.

Le chaos

Si je m'avise de déplacer, ne fût-ce que de la trillionième partie d'un pouce, le grain microscopique de poussière posé maintenant sur le bout de mon doigt, quel est le caractère de l'action que j'ai eu la hardiesse de commettre ? J'ai accompli un acte qui ébranle la lune dans sa marche, qui contraint le soleil à n'être plus le soleil, et qui altère pour toujours la destinée des innombrables myriades d'étoiles qui roulent et flamboient devant la majesté de leur Créateur.

Edgar Poe, *Eurêka*, VI

Il y a, chez Edgar Poe, un fort penchant pour le pathos de la cohésion, ou, selon son propre terme, de la *consistance*. Sa formule clé, c'est « tout se tient ». De là l'importance proprement infinie du moindre geste. En 1963, le météorologue américain Edward Lorenz publie un modèle simplifié de l'atmosphère terrestre. En effectuant des calculs sur ordinateur, il s'est aperçu que son modèle possédait la propriété de « sensibilité aux conditions initiales » : un changement minime dans l'état de l'atmosphère à l'instant zéro donne deux évolutions très différentes au bout d'un certain temps. Puisqu'il est impossible de connaître exactement l'état initial de l'atmosphère réelle, il est impossible de prévoir son évolution à long terme. Ce n'était pas une découverte : « Le poids d'un petit oiseau qui s'y pose suffit à déplacer la Terre », avait noté Léonard de Vinci dans ses *Carnets*. Depuis Maxwell et Poincaré, des physiciens et des mathématiciens connaissaient l'existence de trajectoires instables. Mais la plupart d'entre eux ignoraient l'importance du phénomène. La remarque de Lorenz ne retiendra l'attention du monde scientifique qu'en 1972, quand il présentera une communication intitulée *Prédictibilité : le battement des ailes d'un papillon au Brésil peut-il déclencher une tornade au Texas ?* C'est à partir de ce moment que le « chaos » devient une mode. Le mot fait rapidement fureur. L'enthousiasme pour cette nouvelle science du désordre gagne le grand public. Si celle-ci exerce une telle fascination, c'est sans doute, comme en témoigne son appellation impropre de « théorie du chaos », qu'on l'imagine capable d'exprimer un ordre caché derrière le désordre apparent de la nature, jetant ainsi un pont entre les sciences exactes et le monde de la vie.

La matière sombre

D'autre part, nous savons qu'il existe des soleils non lumineux, c'est-à-dire des soleils dont nous déterminons l'existence par les mouvements des autres, mais dont la luminosité n'est pas suffisante pour agir sur nous.

Edgar Poe, *Eurêka*, IX.

La densité de matière visible ne constitue forcément qu'une borne inférieure à la densité réelle. Tout n'est pas détectable par nos télescopes, aussi perfectionnés soient-ils. Il existe de la *matière sombre* : des trous noirs, des petites étoiles trop peu massives pour allumer des réactions nucléaires et qui sont donc sous-lumineuses, de vastes nuages de gaz interstellaire formés d'hydrogène froid, des particules massives produites lors du Big Bang, etc. Nous disposons de certains moyens pour déceler les traces indirectes de cette matière sombre, non par son rayonnement électromagnétique, mais par les effets

gravitationnels qu'elle engendre sur les mouvements des étoiles et des galaxies. Plusieurs déterminations indépendantes conduisent à penser que l'Univers contient au moins dix fois plus de matière sombre que de matière visible. C'est la quantité et la nature de cette matière sombre qui gouverne le destin ultime de l'Univers : expansion perpétuelle ou expansion-contraction. Les mesures actuelles favorisent la première hypothèse.

Le noir de la nuit

L'observation seule nous montre qu'il y a, dans de nombreuses directions autour de nous, si ce n'est dans toutes, une limite positive ou, tout au moins, elle ne nous fournit aucun motif pour penser autrement. Si la succession des étoiles était illimitée, l'arrière-plan du ciel nous offrirait une luminosité uniforme, comme celle déployée par la Galaxie, puisqu'il n'y aurait absolument aucun point, dans tout cet arrière-plan, où n'existât une étoile. Donc, dans de telles conditions, la seule manière de rendre compte des vides que trouvent nos télescopes dans d'innombrables directions est de supposer cet arrière-plan invisible placé à une distance si prodigieuse qu'aucun rayon n'ait jamais pu parvenir jusqu'à nous. Qu'il en puisse être ainsi, qui oserait s'aviser de le nier ?

Edgar Poe, *Eurêka*, X.

La lumière est fille des ténèbres et la nuit est lourde de lumière. Cette dualité dépasse de loin les seuls champs poétique, métaphysique ou mystique. Elle est au cœur même de la cosmologie moderne : trous noirs, matière sombre, etc. Lecteur, si à l'instant où vous lisez ces lignes une nuit sans lune règne dehors, ouvrez un instant la fenêtre et contemplez sa noirceur. Rien d'étonnant, direz-vous, puisque le soleil est couché... Ce n'est pas si simple ! L'obscurité de la nuit cache un mystère impliquant le cosmos tout entier, son extension et son histoire. C'est le « paradoxe de la nuit noire ». Les astronomes ont longtemps cru que l'espace est infini, éternel et uniformément rempli d'astres. Mais alors, en quelque direction que l'on observe, notre regard devrait finir par rencontrer une étoile sur sa ligne de visée. Autrement dit, le fond du ciel devrait être comme une tapisserie radieuse continûment composée d'étoiles, ne laissant aucune place au noir. Pourquoi n'en est-il pas ainsi ? La question, posée en 1618 par l'astronome allemand Kepler, souleva nombre d'explications. En 1848, Edgar Poe fournit la première réponse satisfaisante : le noir de la nuit repose sur la *finitude du temps*. Le point de départ du raisonnement est le fait que la lumière ne se propage qu'à vitesse finie. Bien qu'acceptée par tous, cette découverte faite au XVII^e siècle par Römer n'avait suscité que peu d'intérêt durant tout le XVIII^e siècle. Il fallut attendre

le début du XIX^e siècle pour que cet intérêt renaisse. Beaucoup de scientifiques et de philosophes prirent alors conscience des implications physiques et métaphysiques de la valeur finie de la vitesse de la lumière. Une vitesse finie de la lumière implique en effet qu'un objet n'est pas tel qu'il paraît être, s'étant déplacé et ayant changé d'apparence, que la partie observable de l'Univers ne s'étend pas au-delà de la distance parcourue par la lumière depuis le commencement, et que son âge est au moins égal à l'étendue de l'univers visible divisée par la vitesse de la lumière, en opposition flagrante avec les théologies dominantes qui donnaient un âge court à l'Univers. Par utilisation des conséquences implicites de la valeur finie de la vitesse de la lumière, Edgar Poe explique que dans le cas d'un univers d'extension infinie peuplé uniformément d'étoiles, l'arrière-plan céleste devrait apparaître, tels des « remparts dorés », avec une luminosité uniforme similaire à celle déployée par la Voie lactée, puisqu'il n'y aurait aucun point dans tout cet arrière-plan où n'existât une étoile. La seule manière de rendre compte des vides interstitiels observés est alors de supposer cet arrière-plan invisible placé à une telle distance qu'aucun rayon lumineux n'aurait eu le temps de parvenir jusqu'à nous depuis le commencement.

En comprenant comment l'obscurité nocturne est riche d'enseignement sur la finitude temporelle du monde, Poe anticipe de plusieurs décennies sur la cosmologie scientifique moderne et son modèle du Big Bang. Les astrophysiciens d'aujourd'hui admettent que l'Univers n'existe (sinon en tant qu'univers, du moins dans un état permettant l'existence des étoiles) que depuis une quinzaine de milliards d'années. Le fond du ciel n'est ainsi guère brillant. Il émet cependant une faible lueur, imperceptible à nos yeux, mais que les radiotélescopes captent dans le domaine des micro-ondes : c'est le vestige de l'éblouissant feu primitif, refroidi par 15 milliards d'années de voyage.

Les nébuleuses extragalactiques

La Galaxie, je le répète, n'est qu'un des groupes dont j'ai parlé, une de ces prétendues nébuleuses, qui ne se révèlent à nous quelquefois qu'à l'aide du télescope, et comme de faibles taches brumeuses dans différentes parties du ciel. Nous n'avons aucune raison de supposer que la Voie lactée soit en réalité plus vaste que la moindre de ces nébuleuses.

Edgar Poe, *Eurêka*, XI.

À la fin du XIX^e siècle, l'astronome Camille Flammarion s'exclame, observant l'amas de nébuleuses regroupées dans la constellation de la Vierge : « Le nombre de nébuleuses éclipse celui

des étoiles ! Que de questions se lèvent en présence de cette richesse ! Chacune de ces taches laiteuses est-elle vraiment un système solaire en création ? Sont-elles perdues au fond de l'infini, à une distance incommensurable au-delà des étoiles ? Sont-elles mélangées avec les soleils qui trônent dans cette étendue ? Seraient-elles plus proches de nous que les étoiles ? » (Camille Flammarion, *Les Étoiles et les curiosités du ciel*, 1882.)

La deuxième de ces hypothèses, selon laquelle certaines nébuleuses spirales sont des galaxies à part entière, prélude à la révolution cosmologique relativiste. Dans le premier quart du XX^e siècle, la cosmologie, c'est-à-dire l'étude de la structure de l'Univers dans son ensemble, devient une discipline scientifique à part entière, grâce à la conjonction d'une avancée théorique (la relativité générale élaborée par Einstein en 1915) et des premiers résultats observationnels à signification cosmique. Edwin Hubble, utilisant le plus puissant télescope de l'époque nouvellement installé au mont Wilson, accomplit en 1925 un pas décisif : ayant pu mesurer les éloignements des nébuleuses spirales, il établit qu'il s'agit d'autres systèmes d'étoiles analogues à notre propre galaxie. Parallèlement, son collègue Vesto Slipher met en évidence un décalage vers le rouge quasi systématique des raies spectrales du rayonnement de ces nébuleuses, ce qui semble impliquer de très grandes vitesses d'éloignement. Ce mouvement de fuite ne sera compris que lorsque la communauté scientifique admettra une idée fondée sur la relativité générale, initialement proposée par le mathématicien russe Alexandre Friedmann en 1922 et par le physicien belge Georges Lemaître en 1927 : l'espace entier se dilate au cours du temps, en un mouvement d'*expansion* qui entraîne l'ensemble des galaxies.

Les germes des galaxies

De ce que nous savons de la marche de la lumière, nous tirons la preuve directe que les étoiles les plus éloignées existent, sous leur forme actuellement visible, depuis un nombre inconcevable d'années. Il faut donc remonter dans le passé au moins jusqu'à la période où commença l'opération qui a constitué les masses.

Edgar Poe, *Eurêka*, IX

L'adhésion de la communauté scientifique aux modèles de Big Bang date de la fin des années 1960, quand fut découvert le rayonnement cosmologique dont l'existence ne s'explique que par ces modèles. Émis à une température de 3 000 degrés, le rayonnement de fond cosmologique nous parvient à une température mille fois plus basse, car entre le moment où il a été émis – il y a 15 milliards

d'années – et le moment où il est reçu – aujourd'hui – sous forme « fossile », l'Univers s'est dilaté d'un facteur 1 000. Le rayonnement fossile nous parvient donc dans la gamme des micro-ondes, précisément à une température de 2,728 Kelvins (soit – 270 °C). Depuis sa découverte, les astrophysiciens ont étudié le rayonnement fossile de toutes les manières possibles. Les résultats les plus impressionnants, qui confirment les modèles de Big Bang de manière la plus spectaculaire, ont été obtenus par le satellite COBE en 1992. La « carte COBE » est sans doute l'une des images les plus émouvantes de toute l'astronomie. Elle représente l'état de l'Univers jeune de 300 000 ans, à l'époque où il n'était qu'une soupe extraordinairement lisse et homogène devenue suffisamment transparente pour laisser jaillir la première lumière. Aucune structure astronomique de type étoile, galaxie, planète, n'existait. Seuls de très légers frissonnements agitaient la soupe. La carte COBE exhibe de minuscules inhomogénéités de température. Toutefois, l'écart entre la région la plus chaude et la région la plus froide n'est que d'un cent millième de degré. Ces variations sont liées à des variations de densité : les régions les plus chaudes sont aussi les plus denses. On voit donc là l'origine de toutes les structures astronomiques, en quelque sorte les germes des futures galaxies.

L'atome primitif

La supposition de l'Unité absolue dans la Particule primordiale renferme celle de la divisibilité infinie. Concevons donc simplement la Particule comme non seulement épuisée par sa diffusion à travers l'Espace. De cette Particule considérée comme centre, supposons, irradié sphériquement, dans toutes les directions, à des distances non mesurables, mais cependant définies, dans l'espace vide jusqu'alors, un certain nombre innombrable, quoique limité, d'atomes inconcevablement mais non infiniment petits.

Edgar Poe, *Eurêka*, IV.

Ce type de raisonnement a été tenu par Georges Lemaître en 1931 dans le cadre de la cosmologie relativiste. Lemaître, s'inspirant des phénomènes radioactifs découverts trente ans plus tôt, a imaginé que la totalité de la matière cosmique, avant le début de l'expansion, devait se trouver sous la forme d'un noyau géant ultradense, comparable aux noyaux atomiques ordinaires mais beaucoup plus grand, dont l'instabilité fondamentale aurait engendré l'expansion : l'atome primitif. « L'atome univers s'est brisé en fragments, chaque fragment en morceaux plus petits. [...] L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer. Quelques

mèches rouges, cendres et fumées. Debout sur une escarville mieux refroidie, nous voyons s'éteindre doucement les soleils et cherchons à reconstituer l'éclat disparu de la formation des mondes. » (*Revue des questions scientifiques*, novembre 1931.)

La conception de Lemaître, revue et corrigée par les progrès ultérieurs de la physique nucléaire, a donné naissance aux modèles de Big Bang. Au sens mathématique du terme, le Big Bang correspond à une singularité où la courbure de l'espace devient infinie. Extrapolation de la relativité générale, le Big Bang échappe aux lois de la physique connue, et une meilleure description de cet état singulier – qui pourrait être obtenue par une unification théorique des interactions fondamentales – est l'un des grands enjeux de la recherche du XXI^e siècle.

Les interactions fondamentales

Écartons maintenant les deux termes équivoques, gravitation et électricité, et adoptons les expressions plus définies d'attraction et de répulsion. La première, c'est le corps ; la seconde, c'est l'âme ; l'une est le principe matériel, l'autre le principe spirituel de l'Univers. Il n'existe pas d'autres principes. Tous les phénomènes doivent être attribués à l'un ou à l'autre, ou à tous les deux combinés.

Edgar Poe, *Eurêka*, V.

Depuis l'Antiquité grecque, la recherche d'unité est au cœur des préoccupations de la physique théorique. Les symétries sont devenues, sous le nom savant de « théorie des groupes », l'un des outils les plus féconds de la science, servant à décrire les particules élémentaires, la physique des solides, la cristallographie, la topologie, etc. Des éléments plus abstraits que la Terre, l'Eau, l'Air et le Feu jouent un rôle organisateur identique aux éléments des Anciens : les « interactions fondamentales ». Au nombre de quatre, elles régissent l'ensemble des phénomènes physiques connus. La gravitation modèle l'Univers à l'échelle des planètes, des étoiles et des galaxies. L'électromagnétisme s'exerce sur les particules chargées et régit les phénomènes lumineux. Deux autres forces inconnues du temps de Poe sculptent l'infiniment petit : l'interaction nucléaire forte explique la cohésion des noyaux atomiques et produit l'énergie des centrales nucléaires, l'interaction faible est responsable de la désintégration radioactive du neutron en proton.

Pour les chercheurs modernes d'unité, quatre, c'est trois de trop. Les interactions fondamentales ne seraient que les reflets à basse énergie d'une force unique, laquelle se serait manifestée lors de la création même de l'espace, du temps et de la matière, dans les

énergies quasi infinies du Big Bang. Les physiciens pensent que, si l'on remonte le fil de l'histoire cosmique et que l'on atteint ainsi des énergies de plus en plus élevées, les interactions fondamentales se fondent l'une après l'autre dans une superinteraction universelle. En sens inverse, l'histoire cosmique donnerait lieu à une suite de découplages entre ces diverses interactions. Chaque scission se produirait sous la forme d'une « transition de phase » qui donnerait lieu à des phénomènes cosmiques particuliers. Les théories d'unification et leur application à la physique de l'Univers restent néanmoins très spéculatives.

Le principe anthropique

Profitions de l'occasion pour parler de la difficulté que nous avons si souvent éprouvée, quand nous poursuivions le chemin battu de la pensée astronomique, à rendre compte de ces vides incommensurables, à expliquer pourquoi des gouffres, si totalement inoccupés et si inutiles en apparence, se sont produits entre les étoiles, entre les groupes, bref, à trouver une raison suffisante de l'échelle titanique, sur laquelle, quant à l'espace seulement, l'Univers paraît avoir été construit. [...] Les considérations qui, dans cet Essai nous ont conduit pas à pas, nous permettent de dire clairement et immédiatement que l'Espace et la Durée ne font qu'un. Pour que l'Univers pût durer pendant une ère proportionnée à la grandeur de ses parties matérielles constitutives et à la haute majesté de ses destinées spirituelles, il était nécessaire que la diffusion atomique originelle se fît dans une étendue aussi prodigieusement vaste qu'elle pouvait l'être sans être infinie. Il fallait, en un mot, que les étoiles passassent de l'état de nébulosité invisible à l'état de solidité visible, et vieillissent en donnant successivement la naissance et la mort à des variétés inexprimablement nombreuses et complexes du développement de la vitalité ; il fallait que les étoiles accomplissent tout cela, trouvassent le temps suffisant pour accomplir toutes ces intentions divines.

Edgar Poe, *Eurêka*, XIII.

Bernardin de Saint-Pierre avait remarqué que le monde était bien conçu pour notre usage : le melon est muni de côtes pour être mangé en famille, le laurier est fait pour la victoire, l'olivier pour la paix. Ce naïf émerveillement devant la nature a été raillé par Voltaire : « Les nez ont été faits pour porter des lunettes », et expliqué par Spinoza : « Les hommes jugent nécessairement de la nature des choses d'après la leur propre. En outre, comme ils trouvent en eux-mêmes et hors d'eux un grand nombre de moyens contribuant grandement à obtenir ce qui est utile [...], ils en viennent à considérer toutes les choses existant dans la nature comme des moyens à leur usage. » Quand Laplace

répondit « Sire, je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse » à Napoléon qui lui demandait quelle place il laissait à Dieu dans l'agencement des mouvements célestes, on pouvait croire qu'il assénait le coup de grâce à l'explication du monde par une volonté divine. Certains discours cosmologiques actuels prétendent toutefois que la probabilité d'apparition de la vie dans l'Univers est nulle par rapport à l'ensemble de toutes les conditions initiales possibles au moment du Big Bang. Une vision finaliste est le ressort inavoué de tels raisonnements ; en effet, argumente-t-on, puisque la vie existe bel et bien dans l'Univers (au moins ici, sur Terre), tout en étant parfaitement improbable sur le plan statistique, c'est qu'elle a nécessairement été programmée par une volonté supérieure, laquelle a ajusté de façon précise les conditions initiales de l'Univers de façon à permettre l'éclosion de l'espèce humaine. Cette interprétation métaphysique de la cosmologie relativiste s'appelle « principe anthropique fort ». Le fait que certains philosophes et scientifiques de renom souscrivent à ce principe – l'Univers a été conçu de sorte qu'il contienne des êtres doués de conscience – suggère qu'il faille bien plus que Spinoza, Voltaire ou Laplace pour éradiquer tout finalisme anthropocentrique.

Ce mode de pensée est tenace car « il est impossible d'imaginer une expérience qui pourrait prouver la non-existence d'un projet » (Jacques Monod, *Le Hasard et la Nécessité*). Le mécanisme ne s'affranchit pas du finalisme puisque, sans pouvoir justifier des conditions initiales de l'Univers, il ne s'interdit pas de les attribuer à une intention transcendante, et d'autre part il se révèle impuissant à expliquer tous les phénomènes, en particulier la vie et encore moins la conscience. Si nous admettons que le sort est toujours dépourvu d'intentions à notre égard, c'est que, propose Konrad Lorenz, « comme il s'aperçoit de la prépondérance de l'absurde dans la marche de l'Univers, l'homme redoute que l'absurde ne l'emporte sur l'aspiration humaine à la rationalité. De cette angoisse naît le besoin intellectuel de chercher un sens caché à tout ce qui arrive ».

Le savoir et l'émotion

J'en étais à ce point quand Eurêka me tomba sous les yeux. Mes études, sous mes ternes et tristes maîtres, m'avaient fait croire que la science n'est pas amour ; que ses fruits sont peut-être futiles, mais son feuillage très épineux, son écorce affreusement rude. [...]

Eurêka m'apprit en quelques moments la loi de Newton, le nom de Laplace, l'Hypothèse qu'il a proposée, l'existence même de recherches et de spéculations dont on ne parlait jamais aux adolescents, de peur, j'imagine, qu'ils ne s'y intéressassent, au lieu de mesurer par des rêves et des bâillements l'étonnante longueur de l'heure. [...] C'était l'époque où de

gros livres de physique ne soufflaient mot de la loi de gravitation, ni de la conservation de l'énergie, ni du principe de Carnot ; ils aimaient les robinets à trois voies, les hémisphères de Magdebourg, et les laborieux et frêles raisonnements que leur inspirait le problème du siphon. Serait-ce toutefois, perdre le temps des études que de faire soupçonner à de jeunes têtes les origines, la haute destination et la vertu vivante de ces calculs et de ces propositions très arides, qu'on leur inflige sans aucun ordre.

Paul Valéry, *Au sujet d'Eurêka*.

Dans l'esprit du public et dans celui des faiseurs d'opinion (les médias), tenace est le préjugé selon lequel les disciplines scientifiques et techniques seraient froides, à la limite inhumaines, tandis que les disciplines littéraires et artistiques seraient chaleureuses et chargées d'émotion. Notre culture et notre éducation nous conditionnent à cet égard : le savoir en tant que tel et son enseignement sont pratiqués de façon froide, dépourvue d'émotion ; à tout le moins, ils ne donnent aucune idée du projet grandiose qui justifierait tant d'heures d'apprentissage laborieux : faire tenir l'organisation et le destin de l'Univers dans une poignée d'équations.

Sans tomber dans l'amalgame, il faut convenir qu'il n'y a pas de voie unique pour décrire le réel. L'ensemble de la science est lié à la culture humaine en général. Les découvertes scientifiques, même celles qui paraissent les plus avancées et difficiles à comprendre, sont dénuées de signification en dehors de leur contexte culturel. Les concepts et les mots pertinents de la science théorique sont tôt ou tard destinés à être exprimés en concepts et en mots qui ont un sens pour le public instruit, et à s'inscrire dans une image générale du monde.

Le flux inverse, à savoir le transfert de concepts purement artistiques vers la science, est également possible. De nombreux artistes ont eu les intuitions fulgurantes de découvertes scientifiques postérieures.

Par ailleurs, peu de scientifiques osent exprimer publiquement d'autres pratiques qu'ils peuvent avoir dans les domaines relevant de l'esthétique : arts plastiques, littérature, poésie, musique. L'inhibition y est pour beaucoup : nombreux s'interdisent ce qu'ils croient être un douteux « mélange des genres » – au sens péjoratif du terme. Cependant, toute découverte scientifique part d'une conjonction de hasard et d'intuition, suivie par un travail lucide et difficile de mise en structure. La réflexion de Paul Valéry : « Le travail interne du poète consiste moins à chercher des mots pour ses idées qu'à chercher des idées pour ses mots et ses rythmes prédominants » s'applique aussi bien à la construction des récits d'Edgar Poe qu'à la créativité du physicien théoricien.

Avec *Eurêka*, Edgar Poe a bâti sur les fondements mathématiques

de l'hypothèse de Laplace un poème abstrait, qui se veut une explication totale de la nature matérielle et spirituelle. Nous ne voyons aucun autre cosmogoniste de l'histoire proclamer que son livre est un poème et que sa beauté même est garante de sa vérité ; nulle part, nous ne voyons identification aussi complète de l'Univers à une œuvre d'art.

Ce n'est pas l'architecture qui fournit à Edgar Poe ses similitudes ; c'est le roman, le drame, le poème : arts de la durée. La symétrie artistique qu'il invoque dans la construction de son récit et de son raisonnement est une symétrie dans la durée : celle de la réaction qui est l'action inversée. Dans l'œuvre de Dieu, comme dans celle du romancier, le temps est un élément essentiel, inséparable de l'espace. Selon l'intuition de Poe, ils ne font qu'un. Durée, dimensions, forces, vitesses sont calculées les unes sur les autres et sur les « destinées spirituelles » de l'Univers : « Quand je me sers de ce terme, *l'Infini de l'Espace*, je ne veux pas contraindre le lecteur à former la conception impossible d'un infini absolu. Je prétends simplement faire entendre *la plus grande étendue concevable* d'espace, domaine ténébreux et élastique, tantôt se rétrécissant, tantôt s'agrandissant, selon la force irrégulière de l'imagination » (*Eurêka*, III).

1- Article publié en août 2001 dans la revue *Europe*, « Edgar Poe ».

Recherche scientifique et écriture, une fertilisation croisée¹

Astrophysicien, écrivain, amoureux de la langue française... J'ai toujours écrit, depuis mon plus jeune âge – des poèmes, quelques naïfs romans de jeunesse que je n'ai pas publiés. Lorsque je suis devenu chercheur en astrophysique, un autre type d'écriture s'est imposé à moi : la publication scientifique spécialisée. L'activité d'un chercheur se mesure essentiellement par ses publications. La plupart d'entre elles sont écrites en anglais et sont très techniques, au point que quelques dizaines de personnes seulement dans le monde les lisent. Mais au total, j'ai dû publier plusieurs centaines de pages d'articles scientifiques...

Après une dizaine d'années de recherche intensive, je me suis remis à écrire et à publier des poèmes, ainsi qu'un bon nombre d'ouvrages dits de « vulgarisation ». Dans ces essais, dont certains traitent de sujets fort compliqués (les trous noirs, la forme de l'Univers) mais adressés à un public assez large, je me suis toujours efforcé de « mettre du roman dans la science », en d'autres termes d'utiliser des techniques narratives empruntées au roman et à la littérature générale.

Pour en revenir à l'écriture poétique, j'ai longtemps pris soin de séparer très fermement création scientifique et création littéraire. Ma poésie n'avait rien de « cosmique », même si elle usait çà et là, de façon analogique, de termes tels que « comète » ou « étoile ». Mon *Noir Soleil* de poète – abandon, solitude, mélancolie, mort – n'avait strictement aucun rapport avec mes *Trous noirs* d'astronome – théorie de la relativité, destin des étoiles, matière sombre. Les seconds, je les avais décrits dans des textes de vulgarisation. Autres thèmes, autres modes d'expression. Pas de mélange des genres. Combien de fois avais-je été agacé par des exclamations du genre : « Vous êtes astronome ? alors, vous devez être aussi poète ! » Combien de fois avais-je aussi été agacé par cette soi-disant « poésie astronomique » se présentant sous forme d'envolées lyriques plaquées sur le jargon scientifique, où des mots grandiloquents affublés de majuscules tels que Champ, Énergie, Onde, Quasar, Big Bang, étaient censés receler à

eux seuls le mystère poétique du monde !

Quand on veut amorcer un débat entre littérature et science, c'est le mathématicien plutôt que le physicien qui semble l'interlocuteur privilégié. Au XVI^e siècle, Jacques Peletier du Mans, l'un des fondateurs de la Pléiade dont la motivation était d'enrichir la langue française de thématiques et d'expressions nouvelles, percevait déjà cette situation. Il y répondit en poète dans une satire, « À ceux qui blâment les mathématiques ».

On ne peut en effet que souligner les relations privilégiées du mathématicien avec le poète, ou le musicien. Il s'agit là de pratiques où la question du langage est déterminante, notamment la recherche d'une économie maximale au service de l'expression la plus forte. Il s'agit toujours de ramasser, de condenser une formulation, de trouver l'« équation », l'algorithme en quelque sorte. Gilbert Lély a défini la poésie de la façon suivante : « À chaque interrogation du monde extérieur, la réponse la plus rapide, la plus nettement articulée, la plus libre, la plus dévorante. » On ne saurait mieux définir la quête du mathématicien. En mathématiques comme en poésie, la forme et le fond sont indissociables. C'est par là sans doute que le poème se différencie de la prose. La vérité du poème se joue là, même si elle renferme, comme en mathématiques, sa part d'inconnu. Yves Bonnefoy, qui a une formation mathématique, parle de cet effort de limpidité qui l'anime lorsqu'il écrit, et qu'il compare à une équation que l'on réduirait à sa « forme canonique », laquelle contient toujours l'inconnu(e).

Pour ma part, j'ai toujours le sentiment, quand j'écris un poème, d'un noyau primitif qu'il s'agit de désintégrer, de fissurer. D'une unité qui, en se désagrégeant, engendre une multiplicité, un foisonnement de sens possibles. C'est là un langage de physicien plus que de mathématicien. J'ai commencé en effet par faire des études de mathématiques au niveau universitaire, mais je me suis ensuite engagé dans les recherches en physique au niveau du doctorat, et j'ai réalisé après coup combien mes interrogations physiques – sur la nature de l'espace et du temps, par exemple – ont influencé ma démarche de poète. Avec le recul, je m'aperçois que l'évolution de ma poésie est liée à ce choix. Avant les années 1980, ma poésie était linéaire, c'est-à-dire purement temporelle. Je jouais peu avec la polysémie du texte. En même temps, je refusais de voir des liens entre le poète et le scientifique en moi. Je me méfiais – et me méfie toujours – des confusions hâtives, des glissements conceptuels qui ne servent ni les sciences ni la poésie. La physique et l'astrophysique, mon intérêt spéculatif pour les univers chiffonnés, pour les trous noirs enfantés par la géométrie non euclidienne et la gravitation relativiste, j'en retrouve la présence active, en quelque sorte « codée » presque à mon insu,

dans mon écriture. C'est depuis ces années 1980 que j'ai découvert et exploré les virtualités spatiales du poème. C'était là rompre avec toute une conception de la poésie considérée comme un art du temps, et l'on peut penser ici à la fameuse opposition classique établie par Lessing entre poésie et peinture, art du temps et art de l'espace.

J'ai vite compris que l'espace était plus riche que le temps, lequel se réduit à deux modalités expressives, deux topologies : linéaire et circulaire. Même dans le domaine musical où le temps est si déterminant, je suis sensible à l'espace, à l'expansion spatiale du son autant que sa notation dans l'architecture de certaines partitions. Dans la musique contemporaine, je suis notamment fasciné par la musique spectrale de Gérard Grisey – avec lequel j'ai d'ailleurs collaboré sur une œuvre, *Le Noir de l'Étoile*, écrite pour six percussionnistes et retransmission *in situ* de signaux astronomiques émis par des pulsars. Je pense aussi aux *Archipels* d'André Boucourechliev, où les blocs de notes composent sur le papier comme les îles d'un archipel au travers desquelles l'interprète vogue à sa guise. Quant à l'espace du poème, je le conçois comme un espace topologique. J'aime découvrir, chez Mallarmé, chez Valéry par exemple, des poèmes qui, présentant une riche expression spatiale, peuvent être pénétrés de multiples façons, d'une manière qui relève de la topo-logie – cette branche de la géométrie qui analyse les espaces en fonction de leurs propriétés globales et les déduit les uns des autres par déformations continues.

Valéry demandait au poème qu'il lui procurât une « sensation d'univers ». Il est certain que cette sensation de totalité est première, qu'elle est à l'origine de mon émotion poétique tout comme de cette passion que j'ai conçue pour la cosmologie – l'étude de l'Univers physique considéré comme un tout. C'est d'ailleurs cette intuition du tout qui empêche encore la cosmologie, aux yeux de certains, d'accéder au statut de science à part entière, en vertu du réquisit selon lequel il ne pourrait y avoir de science du tout. Même si, on le sait, il n'existe pas de bonne définition de l'Univers, on ne peut s'empêcher d'interroger son sens. Le sens nous déborde plus qu'il nous échappe.

Cette sensation d'univers, qui est à l'origine de ma double démarche d'astrophysicien et de poète, a pris un jour le visage d'une émotion déterminante par la grâce d'une phrase lue dans un livre, et dont je me souviendrai à jamais. J'avais une quinzaine d'années, dans ma campagne natale près de Cavaillon, et je venais de lire une encyclopédie d'astronomie, d'une grande aridité de présentation. Soudain, à la dernière page de l'ouvrage où se trouvait résumé un exposé de la relativité générale, et notamment du concept d'espace courbe – auquel je ne pouvais à l'époque rien comprendre –, je suis tombé sur cette phrase qui m'a stupéfait : « L'espace a ici la forme d'un mollusque. » J'ai plus tard étudié les grilles de coordonnées

souples dites du « mollusque de Gauss », qui ont donné après coup un sens mathématique à cette phrase. Je crois pouvoir dire aujourd'hui que c'est le mystère de cette phrase qui a peut-être décidé de ma vocation de chercheur, par l'énigme à la fois poétique et scientifique qu'elle me posait. C'est pour expliciter les courbes et les bosses du mollusque universel que j'ai entrepris mes travaux sur la relativité générale, sur les trous noirs et les univers chiffonnés peuplés de galaxies fantômes. Oui, ma « sensation d'univers » m'aura été donnée par le mollusque d'espace-temps !

Souvent, on me demande si le fait de travailler aux frontières de la physique fondamentale et de la cosmologie, avec des notions où l'infini est omniprésent, ne m'éloigne pas des préoccupations de la vie ordinaire, voire ne me met mal à l'aise. Je suis un grand admirateur de Bachelard, mais sur un point je ne partage pas son sentiment lorsqu'il écrit : « On ne vit pas dans l'infini parce qu'on n'y est pas chez soi. » Cette relation inquiète à l'Univers, cette appréhension négative de l'infiniment grand, je ne l'éprouve pas du tout, même si je puis la comprendre sur le plan historique et culturel. Elle n'est pas nouvelle. Elle est toujours contemporaine de l'effondrement d'une image unifiée, harmonieuse du cosmos. Je pense au retentissement d'une telle situation dans la poésie de John Donne, par exemple, à son admirable « Anatomie du monde », à cet émiettement infini de l'Univers « retournant à l'état des atomes » dont il s'inquiète, à l'aube du XVI^e siècle, après les révolutions cosmologiques introduites par Copernic, Kepler et Galilée. Je pense aussi à Laforgue, qui vit à une époque – la seconde moitié du XIX^e siècle – où la conception d'un espace infini s'est imposée, mais qui, par une projection cosmique de son mal-être personnel, s'alarme d'une souffrance universelle, à proportion infinie. Je comprends cela, mais je me sens plus proche des poètes de la plénitude infinie (et non de l'espace vide et mort de Newton) : Lucrèce – référence antique incontournable –, Whitman, les romantiques allemands, Jean-Paul Richter en particulier, à qui le voyage dans un univers infini inspira « La comète », un chef-d'œuvre de spontanéité créatrice.

Sans doute peut-on distinguer deux types de sensibilités, l'une réceptive à la totalité finie, l'autre à la fragmentation, aux flux permanent des choses : Parménide et Héraclite. Ce plan de clivage se trouve dans la sensibilité poétique tout autant que dans la créativité scientifique. Elle engagera le savant à se lancer dans telle ou telle piste de recherche au détriment d'une autre, elle engagera le poète à interpréter et « vivre » différemment les nouvelles données de la science. Je pense toutefois que ces deux tempéraments peuvent être réconciliés, car pour ma part, je me sens à l'aise dans ma maison infinie, pour répondre à Bachelard. Je construis des modèles d'univers

chiffonnés qui sont finis mais qui donnent l'illusion d'être infinis ; tandis que dans mes poèmes, je tente d'édifier, comme Claudel, ma « maison fermée », mais une maison où l'infini pourrait rentrer, lavé du mépris inquiet où le tenait l'auteur des *Cinq Grandes Odes*.

L'un des poètes les plus profonds que je connaisse est Omar Khayyâm. Cet humaniste persan du XI^e siècle fut sollicité d'un côté par le vizir Nidham al Mulk, qui lui offrit le pouvoir politique, de l'autre par Hassan Ibn as-Sabbah, le fondateur de la secte des Assassins, qui lui offrit le pouvoir religieux. Khayyâm refusa ces deux pouvoirs, choisissant de se consacrer exclusivement à la science et à la poésie. Mathématicien et astronome, il dirigea l'observatoire de Nichâpur et prépara la réforme du calendrier persan. Poète, il prescrivit le vin et l'amour comme remèdes à tous les maux de la condition humaine. Nul ne fut mieux placé que lui pour parler de la vaine ambition du savant, de celui qui ne se préoccupe que de résoudre l'énigme universelle en oubliant tout contact avec la réalité terrestre. Le souci constant de Khayyâm fut d'emprunter toutes les voies qui s'offrent à la connaissance, convaincu que tout chemin à sens unique mène vers l'impasse. C'est dans cette impasse, dit-il dans ses quatrains, que se fourvoient les purs hommes de science, « ces perceurs maladroits des perles du savoir ».

Le recueil de poèmes que j'ai commencé à la fin des années 1990, mais que je n'ai publié qu'en 2004, *Itinéraire céleste*, a traduit la fin de la schizo-phrénie volontaire et têtue que je m'étais jusqu'alors imposée, et qui me faisait considérer les deux pôles intellectuels de ma créativité – science et poésie – comme parfaitement étrangers l'un à l'autre, voire antagonistes. Mes précédents recueils exprimaient la pure émotion individuelle, perçue dans ma seule sensibilité. Celui-ci a mis l'inépuisable flux et reflux de l'espace intérieur en résonance poétique avec celui de l'espace cosmique. Nul apaisement particulier : harmonie et désordre continuent de régner tour à tour dans ces espaces. Mais l'itinéraire céleste est celui d'un imaginaire poétique s'envolant vers une forme élargie de l'expression littéraire.

Ce n'est d'ailleurs sans doute pas un hasard si, à la même époque, j'ai estimé qu'il pouvait être intéressant de « mettre de la science dans le roman », c'est-à-dire d'utiliser les fabuleuses histoires de certains hommes de science pour en faire des héros de roman. Dans cette veine, j'ai commencé avec *Le Rendez-vous de Vénus*, qui se déroule au siècle des Lumières, j'ai poursuivi avec *Le Bâton d'Euclide*, un roman sur l'histoire de la bibliothèque d'Alexandrie – un hymne à la transmission des savoirs par-delà les clivages idéologiques et religieux, sujet plus que jamais d'une brûlante actualité. Et en 2006 j'ai commencé, avec *Le Secret de Copernic*, une série romanesque qui fera pénétrer dans la vie, l'œuvre et la pensée de ces grands découvreurs

qui, entre le XVI^e et le XVII^e siècle, ont bouleversé le monde, bousculé les vieilles croyances et révolutionné notre image de l'Univers².

À travers l'écriture romanesque je souhaite, à l'instar d'Alexandre Dumas, l'un de mes modèles, instruire tout en divertissant. Dans la mise en scène de la science, ce n'est pas de vulgarisation qu'il s'agit, mais de sensibilisation. La fiction permet de mettre de la chair sur des personnages historiques et des concepts à première vue rebutants, parce que « scientifiques ». Le roman humanise le propos et démontre que le savoir n'est jamais séparé de l'émotion.

En résumé, ma vie de chercheur et d'écrivain est ainsi la quête d'une double mesure : celle du cosmos et celle des profondeurs de l'âme humaine.

1- Texte non publié, 2007.

2- La série de quatre romans a été achevée en 2010 et a pour titre *Les Bâtisseurs du Ciel* (éd. J.C. Lattès)
[Note ajoutée pour la présente édition].

Crédits photographiques

Toutes photos et illustrations : © DR, et :

Cahier 1, figure 10 : *La Naissance de Vénus*, tempera sur toile de Sandro Botticelli (1445-1510), Florence, Galerie des Offices.

: *La Naissance de Vénus*, huile sur toile d'Amaury-Duval (1808-1885), Lille, Palais des beaux-arts.

Cahier 1, figure 12 : *Vénus et Adonis*, huile sur toile de Annibale Carracci (1560-1609), Vienne, Kunsthistorisches Museum.

Cahier 1, figure 15 : *Observation du transit de Vénus par Crabtree en 1639*, peinture murale de Ford Madox Brown (1821-1893), Manchester Town Hall, Manchester City Council.

Cahier 2, figure 5 et 6a : *La Nuit étoilée*, huile sur toile de 1889 de Vincent Van Gogh (1853-1890), New York, Museum of Modern Art, © aisa/leemage.

Toutes les œuvres de M. C. Escher : © 2011, The M. C. Escher Company-Holland. All rights reserved www.mcescher.com.



Figure 1.

Apparence lointaine d'un trou noir sphérique entouré d'un disque d'accrétion. Le système est vu de très loin dans une direction légèrement inclinée au-dessus du plan du disque. L'image tient compte des propriétés physiques du disque gazeux et de divers effets relativistes, ce qui explique la dissymétrie du flux lumineux. La totalité du dessus du disque est visible, y compris la portion qui serait « normalement » cachée dans une géométrie sans courbure ; ceci s'explique par un « relèvement » des trajectoires lumineuses dans le champ de gravitation du trou noir. On voit aussi une partie du dessous des anneaux : c'est l'image secondaire, collée au bord du trou noir. Le disque d'accrétion du trou noir peut ainsi être vu côté pile et côté face ! En théorie, une infinité d'images sont créées par les rayons lumineux qu'émet le disque, puisque ceux-ci peuvent s'enrouler un nombre arbitraire de fois autour du trou noir avant d'échapper à son champ gravitationnel et parvenir à un astronome extérieur (calcul de J.-A. Marck).



Figure 2.

Simulation numérique montrant le mirage gravitationnel qu'engendrerait un trou noir passant dans l'axe de visée du Grand et du Petit Nuage de Magellan, deux petites galaxies satellites de la nôtre. La lentille gravitationnelle créée par le trou noir permet de voir une image secondaire de la *totalité* de la Voie lactée, alors que le champ de vue ne montre qu'une toute petite portion de l'image directe (en haut à gauche). Les deux étoiles brillantes à gauche sont α et β du Centaure, suivies le long de la Voie lactée par la constellation de la Croix du Sud. L'étoile la plus brillante, au nord-est du Grand Nuage, est Canopus, l'autre étoile brillante en bas à droite est Achernar. L'augmentation de la taille du Grand Nuage et sa distorsion sous forme de deux grands croissants, dues au mirage gravitationnel du trou noir, sont extrêmement spectaculaires. On peut aussi reconnaître les images secondaires des étoiles brillantes. C'est facile pour α et β du Centaure grâce à leur alignement avec la Voie lactée (et donc l'alignement des images secondaires correspondantes). Cela devient plus difficile pour la Croix du Sud, considérablement déformée. On note aussi les images multiples de Canopus. © Alain Riazuelo.



Figure 3. Un champ de galaxies.



Figure 4. Le ciel profond photographié par le télescope spatial Hubble.

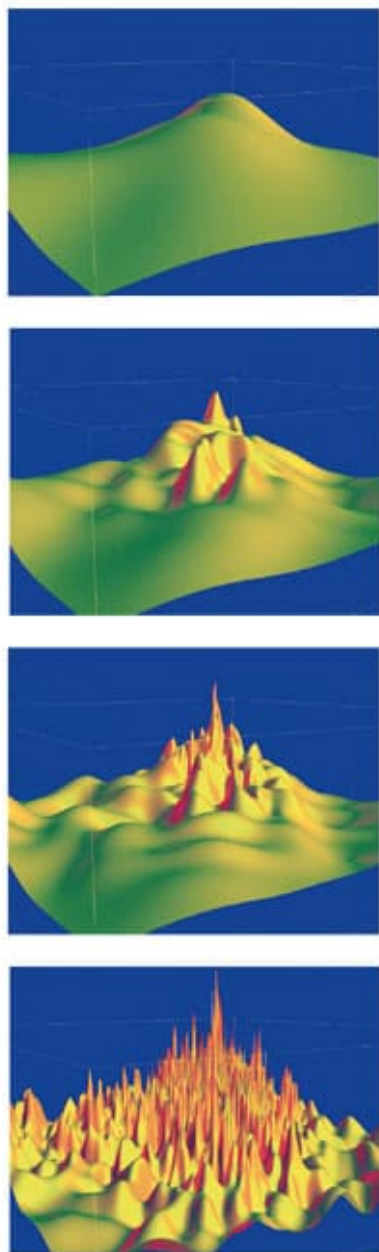


Figure 5A, Figure 5B, Figure 5C, Figure 5D. Explosion du vide quantique (simulation numérique par A. Linde).

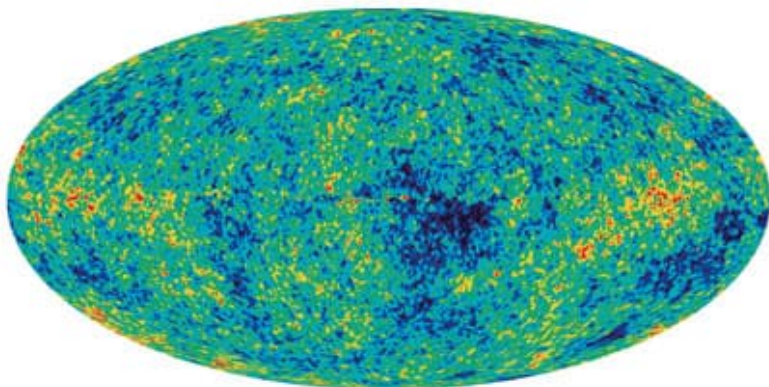


Figure 6. Le rayonnement fossile vu par la sonde WMAP

La totalité du ciel est représentée ici dans le domaine des micro-ondes, et dévoile la lueur résiduelle que le jeune univers a émise après 380 000 ans d'expansion. Les minuscules fluctuations de température sont codées par des couleurs. Elles correspondent aux infimes grumeaux de densité qui, en se condensant, ont engendré plus tard les premières galaxies. L'âge de l'Univers, sa géométrie, sa composition et son destin sont inscrits dans la distribution statistique des grumeaux (© Nasa-WMAP Science Team).



Figure 7. Représentation de Vénus comme étoile du Berger dans le Calendrier des Bergers.



Figure 8. L'étoile du Berger illustrée par Grandville.



Figure 9. *Vénus et le Soleil*, manuscrit alchimique de Salomon Trismosin.



Figure 10. *La Naissance de Vénus* par Botticelli.



Figure 11. *La Naissance de Vénus* (peinture d'Eugène Amaury-Duval).



Figure 12-13. Peintures représentant les amours de Vénus.





Figure 14. *Les Amours de Mars et Vénus*, fresque du 11^e siècle.



Figure 15. *Observation du transit de Vénus par Crabtree en 1639* (peinture de Ford Maddox Brown).

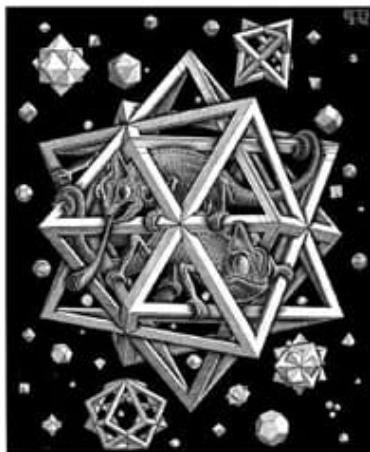


Figure 1. Étoiles,
M. C. Escher.



Figure 2. Le Météore d'Ensisheim
peint par Dürer.



Figure 3. Triangle de Penrose, photographie de Bruno Ernst.

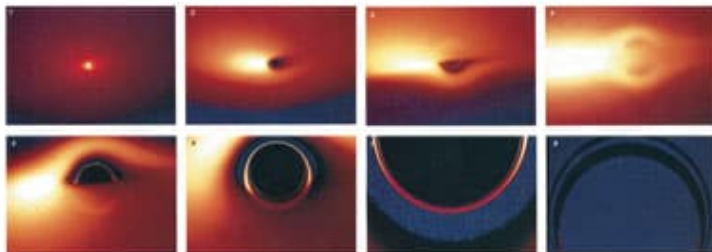


Figure 4. Voyage dans un trou noir, simulation par J.-A. Marck (1993).



Figure 5. *La Nuit étoilée* par Vincent Van Gogh (1888 et 1889).

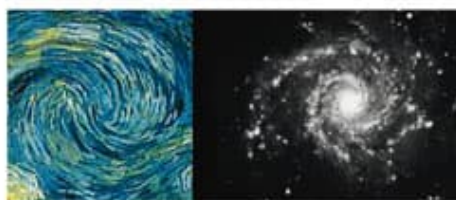


Figure 6. La spirale de Van Gogh (détail) et la galaxie spirale M74 dans la constellation des Poissons.



Figure 7. Mosaïques de l'Alhambra à Grenade.



Figure 8. Quatre pavages à 3 couleurs par M. C. Escher.



Figure 9. Fond de ciel.

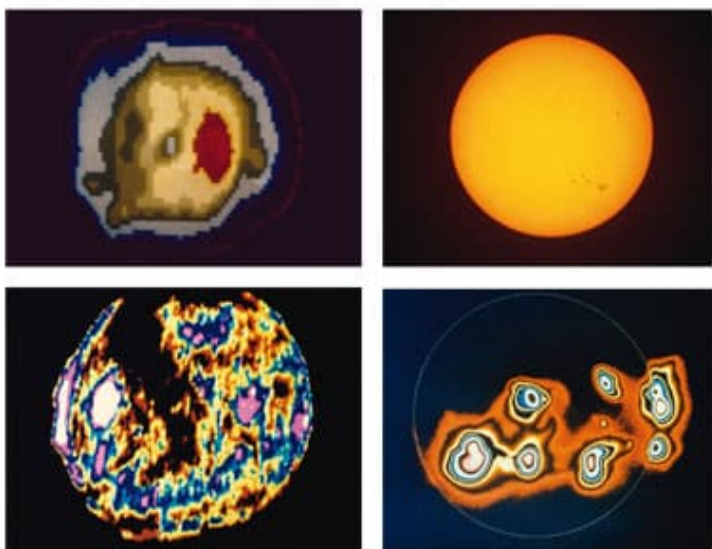


Figure 10. Quatre images du Soleil.



Figure 11a. Couleur des étoiles.



Figure 11b. Nébuleuse.



Figure 11c. Globule de Bok.

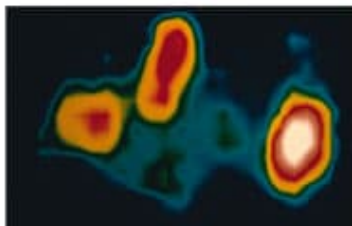


Figure 12a. Protoétoiles en infrarouge.

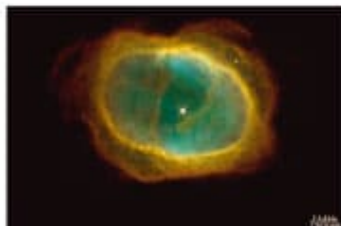


Figure 12b. Nébuleuse planétaire.



Figure 13. SN 1054.



Figure 15. Champ de galaxies.



Figure 14. Collision, spirales.



Figure 16. Hyperlumière, de Serge Salat.



Figure 18. Image photographique moderne d'Orion.
(S. Kohle, Université de Bonn).

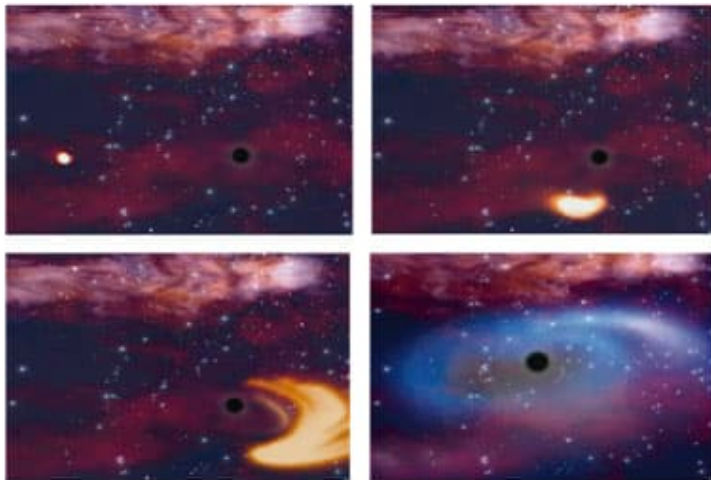


Figure 17. Crêpe stellaire.



Figure 19a.

La nébuleuse d'Orion et le «Golfe», zone d'étoiles en formation.



Figure 19b.

La nébuleuse de la Tête de Cheval, près des étoiles du Baudrier (en bleu).



Figure 20a.

Par rapport à la vision en optique (cliché de gauche), celle en rayons X (cliché de droite) met en évidence les sources les plus énergétiques : pulsars (Crabe), sources binaires à accretion (4U 0614 + 09), etc. Par exemple, l'étoile Sirius (n'appartenant pas à Orion mais à la constellation du Grand Chien) est la plus brillante du ciel dans le domaine optique.



Figure 20b.

Où, sur le cliché de droite, elle est invisible car elle n'émet pas de rayons X. En revanche, sa compagne, une naine blanche appelée Sirius B, est invisible dans le domaine optique mais très brillante dans le domaine X car sa surface est extrêmement chaude.

© Konrad Dennerl, ROSAT; Max Planck Institut Garching.

Du même auteur
chez Odile Jacob

Bonnes Nouvelles des étoiles (avec Élisabeth Brune), 2009.

Qu'est-ce que l'Univers ?, volume 4 (sous la direction d'Yves Michaud), « Université de tous les savoirs », 2001.